

# **SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO AO CORTE DE ELEMENTOS DE BETÃO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

**ADRIANO BAPTISTA GONÇALVES**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS**

---

Orientador: Professor Doutor Rui Manuel Carvalho Marques de Faria

JULHO DE 2013

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

TEL. +351-22-508 1901

FAX +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

*Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*

*Rua Dr. Roberto Frias*

*4200-465 PORTO*

*Portugal*

*Tel. +351-22-508 1400*

*Fax +351-22-508 1440*

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha Família



## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar gostaria de Agradecer ao Professor Doutor Rui Faria pelo apoio prestado e pela oportunidade concedida para a realização deste trabalho.

Deixo os meus agradecimentos ao Mestre Luís Pedro Pereira Teixeira pelo apoio dado na dissipação das dúvidas do SAFIR e pelos documentos facultados.

Ao Engenheiro Manuel Fernandes, que com o seu apoio tem permitido estar aqui e a realizar este trabalho.

À minha família que sempre acredita em mim, e sempre têm-me apoiado nesses momentos.

Aos Meus Pais Por tudo



## RESUMO

As roturas por corte devidas ao fogo são raras, mas possíveis de acontecerem. Para a verificação da resistência ao corte em elementos de betão armado o EC2-1-2 propõe no seu Anexo D métodos de cálculo simplificados a serem utilizados. Estes métodos baseiam-se nos métodos de análise ao corte apresentados no referido anexo, utilizados considerando o efeito de temperatura nos materiais que constituem o elemento.

Os efeitos de temperatura para análise ao corte podem ser determinadas utilizando o Método da Isotérmica dos 500°C ou o Método das Zonas.

Quando é utilizado o Método da Isotérmica dos 500°C é reduzida a resistência das armaduras enquanto a resistência do betão não é alterado. No Método das Zonas é reduzida tanto a resistência do aço como a resistência do betão. A geometria da secção é reduzida nos dois métodos.

A aplicação dos métodos de cálculo avançado apresenta resultados rigorosos do comportamento de estruturas em situação de incêndio. Contudo grande parte destes métodos não contempla a verificação de segurança ao corte dos elementos de betão armado.

Neste trabalho é elaborado duas aplicações computacionais que permitem fazer a análise do comportamento ao corte dos elementos de betão armado sujeitos ao fogo.

A primeira aplicação, designada de *Comportamento ao corte de elementos de betão armado em situação de incêndio - Esforço Transverso*, permite analisar o comportamento de secções ao esforço transverso, a partir do Método da Isotérmica dos 500°C e do Método das Zonas.

A segunda designada de *Comportamento ao corte de elementos de betão armado em situação de incêndio - Torção*, permite fazer a análise quer para a torsão isolada como para a torsão combinada com o esforço transverso. Esta análise só é feita pelo Método da Isotérmica dos 500°C, onde é proposto duas alternativas de análise, a Alternativa\_1 e a Alternativa\_2; sendo que a Alternativa\_1 é mais conservativa que a Alternativa\_2

As análises feitas pelas aplicações permitiram constatar que a escolha do método tem pouca influência nos resultados finais, não obstante o Método das Zonas ser mais rigoroso.

**PALAVRAS-CHAVE:** Cálculo em situação de incêndio, comportamento ao corte de elementos de betão armado, métodos de cálculo, aplicação computacional, incêndio padrão.





## ABSTRACT

The disruptions caused by cutting the fire are rare, but possible happen. To check the shear strength in reinforced concrete elements the Eurocode 2 part 1-2 proposed in Annex D simplified calculation methods to be used. These methods are based on analysis methods for the cutting shown in annex considering the effect of temperature on the materials constituting element.

The effects of temperature shear can be determined using the 500°C Isotherm Method or the Zone Method.

When using the 500°C Isotherm Method is reduced while the strength of the reinforcement the concrete is not changed. In the Zone Method is reduced the strength of steel with the both resistance of the concrete. The geometry of the section is reduced in the both methods

The application of the advanced calculation methods presents results of rigors behaviour of structures in the fire. However, mast of these methods does not include the security of reinforced concrete elements.

This work designed to allow two applications to computational analysis of shear behaviour reinforced concrete elements subjected to fire.

The first application, called *Comportamento ao corte de elementos de betão armado em situação de incêndio - Esforço Transverso*, to analyze of shear sections, from the 500°C Isothermical Method and the Zone Method.

The second designated application, *Comportamento ao corte de elementos de betão armado em situação de incêndio – Torção* allows the analysis to either torsion isolated as for torsion combined with shear. This analysis is only made by the the 500°C Isothermal Methods, where it is proposed two alternative analysis, Alternativa\_2 and Alternativa\_2. Being Altenativa\_1 that more conservative than Alternativa\_2

The analysis made applications showed that it choosing the method has little influence on the final results, notwithstanding the method of zones to be more rigorous.

**KEYWORDS:** calculation in case of fire, shear of reinforced concrete, calculation methods, computer application, standard fire.



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>i</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>v</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. OBJECTIVOS DO TRABALHO .....	1
1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	2
<b>2. COMPORTAMENTO DE ELEMENTOS DE BETÃO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO - ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>3</b>
2.1. INTRODUÇÃO .....	3
2.2. Propriedades dos materiais em situação de incêndio .....	4
2.2.1. Betão .....	5
2.2.1.1. Propriedades térmicas e físicas.....	5
2.2.1.2. Propriedades mecânicas .....	8
2.2.2. AÇO .....	10
2.2.2.1. Propriedades térmicas e físicas .....	11
2.2.2.2. Propriedades mecânicas .....	12
2.3. AÇÕES TÉRMICAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO .....	14
2.3.1. CURVAS DE INCÊNDIO .....	15
2.3.1.1. Curvas de Incêndio natural .....	15
2.3.1.2. Curvas Nominais .....	15
2.3.1.3. Curvas Paramétricas .....	17
2.3.2. COMBINAÇÃO DE AÇÕES.....	17
2.4. MÉTODOS DE CÁLCULO .....	20

2.4.1. MÉTODO TABULAR .....	20
2.4.2. MÉTODOS SIMPLIFICADOS .....	21
2.4.2.1. Método da Isotérmica dos 500°C.....	22
2.4.2.2. Método das Zonas .....	23
2.4.2.3. Método de cálculo para verificação da resistência ao esforço transversal e à torção .....	25
2.4.3. MÉTODOS AVANÇADOS .....	28
2.4.2.3.SAFIR.....	29
<b>3. COMPORTAMENTO AO CORTE DE ELEMENTOS DE BETÃO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO .....</b>	<b>31</b>
<b>3.1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>31</b>
<b>3.2. ESFORÇO TRANSVERSO .....</b>	<b>32</b>
3.2.1. CÁLCULO DO ESFORÇO TRANSVERSO EM SECÇÕES À TEMPERATURA AMBIENTE .....	32
3.2.2. CÁLCULO DO ESFORÇO TRANSVERSO EM SECÇÕES EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO .....	34
3.2.2.1. Pelo Método da Isotérmica dos 500°C .....	34
3.2.2.1. Pelo Método das Zonas .....	35
<b>3.3. TORÇÃO.....</b>	<b>36</b>
3.3.1. CÁLCULO DA TORÇÃO EM SECÇÕES À TEMPERATURA AMBIENTE .....	36
3.3.2. CÁLCULO DA TORÇÃO EM SECÇÕES EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO.....	40
3.3.2.1. Cálculo da torção utilizando o Método da Isotérmica dos 500°C.....	42
3.3.2.2. Cálculo da torção utilizando o Método das Zonas .....	43
<b>4.DESENVOLVIMENTO DA APLICAÇÃO COMPUTACIONAL.....</b>	<b>45</b>
<b>4.1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>45</b>
<b>4.2. MÉTODOS DE ANÁLISE.....</b>	<b>45</b>
<b>4.3. ORGANIZAÇÃO E FUNCIONAMENTO DAS APLICAÇÕES DESENVOLVIDAS .....</b>	<b>46</b>
4.3.1. INTRODUÇÃO DE DADOS .....	47
4.3.2. TRATAMENTO DE DADOS.....	49
4.3.2.1 ESFORÇO TRANSVERSO.....	49

4.3.2.1 TORÇÃO .....	50
4.3.2. RESULTADOS .....	50
<b>5. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO .....</b>	<b>53</b>
<b>5.1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>53</b>
<b>5.2. ESFORÇO TRANSVERSO .....</b>	<b>53</b>
5.2.1. EXEMPLO A.1: ROTURA CONDICIONADA PELO ESGOTAMENTO DA CAPACIDADE DOS ESTRIBOS .....	54
5.2.1.1. Cálculo à temperatura ambiente .....	54
5.2.1.2. Cálculo em situação de incêndio .....	56
5.2.2. EXEMPLO A.2: ROTURA CONDICIONADA PELO ESMAGAMENTO DAS ESCORAS COMPRIMIDAS DE BETÃO.....	69
5.2.2.1. Cálculo à temperatura ambiente .....	70
5.2.2.2. Cálculo em situação de incêndio .....	72
<b>5.3. TORSÃO .....</b>	<b>75</b>
5.3.1. EXEMPLO B.1: ANÁLISE DA TORSÃO ISOLADA NUMA SECÇÃO CHEIA .....	76
5.3.1.1. Cálculo à temperatura ambiente.....	76
5.3.1.2. Cálculo em situação de incêndio .....	78
5.3.2. EXEMPLO B.2: ANÁLISE DA TORSÃO ISOLADA NUMA SECÇÃO OCA .....	81
5.3.2.1. Cálculo em situação de incêndio.....	82
<b>5.4. EXEMPLO C.1: ANÁLISE DA TORSÃO COMBINADA COM O ESFORÇO TRANSVERSO .....</b>	<b>84</b>
5.4.1 CÁLCULO À TEMPERATURA AMBIENTE .....	84
5.4.2. CÁLCULO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO .....	85
<b>6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>89</b>
<b>6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>89</b>
<b>6.1. CONCLUSÕES DO TRABALHO .....</b>	<b>90</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>91</b>
<b>ANEXO A .....</b>	<b>A</b>
<b>ANEXO B .....</b>	<b>B</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Condutividade térmica do betão [1] .....	6
Figura 2.2: Evolução do calor específico com a temperatura e com a humidade do betão [1] .....	7
Figura 2.3: Coeficiente de redução da tensão de rotura do betão à tração a temperaturas elevadas .....	9
Figura 2.4: Redução da resistência à tração por compressão diametral do betão com a temperatura [3] .....	10
Figura 2.5: Evolução do calor específico do aço em função de temperatura [5] .....	11
Figura 2.6: Modelo para a relação tensões – extensões para aços para betão armado e pré-esforçado a temperaturas elevadas [1] .....	12
Figura 2.7: evolução da extensão térmica com a temperatura. ....	14
Figura 2.8: Principais estágios de um incêndio Natural [7] .....	15
Figura 2.9: Curvas de Incêndio nominal .....	16
Figura 2.10: Possíveis situações de incêndio num edifício [8]. ....	19
Figura 2.11: Valores do fator de redução [1] .....	19
Figura 2.12: Dimensão para diferentes tipos de secção transversal. ....	21
Figura 2.13: Secção transversal reduzida de uma viga ou um pilar .....	23
Figura 2.14: Redução da secção transversal para o Método das Zonas .....	24
Figura 2.15: Divisão das zonas e localização do ponto M [1] .....	25
Figura 2.16: Cálculo do fator de redução por via gráfica [1] .....	26
Figura 2.17: Ponto para o cálculo de temperatura de referência dos estribos no esforço transversal [1]. ....	27
Figura 2.18: Ponto para o cálculo de temperatura de referência dos estribos para a torção. ....	28
Figura 3.19: Modelo da treliça de Morsch para o cálculo do esforço transversal [16] .....	32
Figura 3.20: Cálculo de temperatura de referência .....	35
Figura 3.21: Notação dos termos utilizados para Expressões de cálculo da torção [16] .....	38
Figura 3.4: Localização do ponto para temperatura de referência nos estribos de torsão [1]. ....	41
Figura 3.5: Variação com o tempo de temperatura numa secção de betão .....	42
Figura 4.22: Método geral de análise .....	46
Figura 4.23 Organização dos dados introduzidos .....	48
Figura 4.3: Fluxograma de dados de entrada e saída na análise térmica .....	48
Figura 4.4: Procedimento geral na análise dos dados para o Esforço Transverso .....	49
Figura 4.5: Procedimento geral na análise dos dados para a Torsão. ....	50
Figura 4.6: Fornecimento dos resultados da análise .....	51
Figura 5.1: Ações a utilizar no Exemplo A.1 .....	54

Figura 5.2: Esforço atuante à temperatura ambiente para o Exemplo A.1 .....	55
Figura 5.3: Esforço atuantes em situação de incêndio para o Exemplo A.1 .....	57
Figura 5.4: Temperatura na secção exposta durante 56 minutos de Incêndio Padrão .....	58
Figura 5.5: Fator de redução do betão determinado a meia altura da secção .....	61
Figura 5.6: Fator de redução do betão calculado a altura $h_{ef}$ .....	64
Figura 5.7: Exemplo de utilização da Aplicação desenvolvida para o esforço transversal .....	65
Figura 5.8 Ações e Geometria da secção transversal a utilizar no Exemplo A.2 .....	70
Figura 5.9: Variação das resistências ao esforço transversal e esforço transversal máximo para o Exemplo A.2 ...	75
Figura 5.10: Cálculo da espessura efetiva pela Alternativa_2 .....	80
Figura 5.11: Comparação dos resultados entre a secção cheia e a secção oca .....	83
Figura 5.12: Relação entre o esforço transversal e o momento torsor. ....	88





## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Coeficiente de redução à compressão ( $k_c(\theta)$ ) do betão e extensões ( $\epsilon_{c,\theta}$ ) [1] .....	8
Tabela 2.2: Valor dos parâmetros da relação tensão – extensão do aço (classe N) para betão armado à temperaturas elevadas .....	13
Tabela 2.3: Largura mínima em função da resistência ao fogo .....	22
Tabela 5.1: Resultados do Exemplo A.1 pelo Método da Isotérmica dos 500°C .....	66
Tabela 5.2: Resultados do Exemplo A.1 pelo Método da Zonas com $k_c(\theta)$ a $H/2$ .....	68
Tabela 5.3: Resultados da análise feita pelo Método da Zonas com $k_c(\theta)$ a $h_{ef}$ .....	69
Tabela 5.4: Resultados do Exemplo A.2 pelo Método da Isotérmica dos 500°C.....	73
Tabela 5.5: Resultados do Exemplo A.2 pelo Método da Zonas com $k_c(\theta)$ a $H/2$ .....	73
Tabela 5.6: Resultados do Exemplo A.2 pelo Método da Zonas com $k_c(\theta)$ a $h_{ef}$ .....	74
Tabela 5.7: Variação da espessura efetiva e da torsão para a secção cheia .....	81
Tabela 5.8: Variação da espessura efetiva e da torsão para a secção oca .....	82
Tabela 5.9: Resultados para o efeito combinado de esforço transversal momento torsor .....	87





# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. OBJECTIVOS DO TRABALHO

Ao longo dos tempos têm surgido vários procedimentos para a verificação da segurança de estruturas de betão armado em situação de incêndio.

No Eurocódigo 2 Parte 1-2 é indicado alguns procedimentos para a verificação da segurança das estruturas em situação de incêndio, mas as verificações ao corte (esforço transversal e torsão) estão insuficientemente tratadas.

Os objetivos gerais deste trabalho são:

- Fazer um estudo sobre os procedimentos apresentados no EC2-1-2 para a verificação da resistência ao fogo de estruturas de betão armado;
- Desenvolver uma aplicação computacional para a verificação da segurança ao corte de elementos de betão armado sob a ação do incêndio padrão;
- Fazer uma análise do comportamento ao esforço transversal e à torsão de secções de betão armado em situação de incêndio de acordo com os resultados obtidos pela aplicação desenvolvida.

Dos vários procedimentos de análise de estruturas de betão armado em situação de incêndio presentes no EC2-1-2 constitui objetivo deste trabalho fazer a análise sobre os procedimentos para a verificação ao esforço transversal e à torsão.

No EC2-1-2 é indicado dois métodos simplificados utilizados na análise do comportamento ao corte de elementos de betão armado em situação de incêndio. Os dois métodos simplificados são o Método da Isotérmica dos 500°C e o Método das Zonas.

A utilização destes dois métodos é dependente da temperatura instalada na secção que varia de acordo com a variação do tempo de fogo.

O Eurocódigo 2 Parte 1-2 indica alguns perfis de temperatura para algumas secções tipo e para uma duração especificada a serem utilizados nesses métodos. Os perfis apresentados são restritos às secções tipo e à duração fixada. Por isso ultrapassar esta barreira constitui um dos objetivos do desenvolvimento das aplicações computacionais presentes neste trabalho de forma a:

- Conhecer o comportamento ao corte numa secção para um tempo qualquer ou para o tempo máximo que a mesma é capaz de resistir ao fogo
- Saber as resistências em situação de incêndio, nomeadamente o esforço transversal e a torção para um determinado tempo de exposição ao fogo ou para o tempo onde estas resistências são máximas.

Dada a complexidade e ao pouco estudo do comportamento ao corte dos elementos de betão armado em situação de incêndio em projetos de estruturas é muitas vezes negligenciada o risco de ocorrência de roturas devido a esse fenómeno. Além disso grande parte dos programas de cálculo ao fogo existentes (SAFIR por exemplo) não contempla as roturas por corte.

Um outro objetivo é desenvolver programas de cálculo ao corte de elementos de betão armado em situação de incêndio que sejam de simples utilização para servir como apoio aos projetos destes elementos.

As aplicações foram desenvolvidas com base nos métodos simplificados do EC2-1-2, Método da Isotérmica dos 500°C e o Método das Zonas. Por isso estas aplicações desenvolvidas serão utilizadas para fazer uma análise comparativa entre estes dois métodos quando utilizados para avaliar o comportamento ao esforço transversal e à torção de elementos de Betão armado em situação de incêndio.

## **1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

Este trabalho encontra-se organizado em seis Capítulos, incluindo a introdutória, os quais são tratadas os seguintes temas:

- No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica sobre o comportamento ao corte dos elementos de betão armado em situação de incêndio. Este comportamento é influenciado pelo comportamento dos materiais que constituem os referidos elementos nomeadamente o aço e o betão, por isso é apresentado as principais propriedades térmicas e mecânicas destes dois materiais em situação de incêndio. Também é abordado a quantificação das ações e os métodos de cálculos presentes no EC2-1-2.
- No Capítulo 3 fala-se de forma específica do comportamento ao corte de elementos de betão armado em situação de incêndio, nomeadamente sobre o comportamento ao esforço transversal e à torção. Os métodos de cálculos apresentados são os referidos nos EC2-1-2, Anexo D. É abordada a utilização do Método da Isotérmica dos 500°C e do Método das Zonas no cálculo do esforço transversal e da torção.
- No Capítulo 4 é apresentado as duas aplicações computacionais desenvolvidas neste trabalho, referindo à organização e ao funcionamento dos mesmas e aos métodos de cálculo considerados nestas aplicações.
- No Capítulo 5 são apresentados alguns exemplos de aplicação quer para o esforço transversal como para a torção. Os exemplos feitos foram analisados tanto pelo Método da Isotérmica dos 500°C como pelo Método das Zonas. Para o esforço transversal é apresentado exemplos onde a rotura ocorre pelo esgotamento da capacidade resistente dos estribos e um exemplo onde a rotura pode ocorrer por esmagamento das escoras comprimidas de betão. A torção foi analisada tanto de forma isolada como quando a mesma é combinada com o esforço transversal.
- No Capítulo 6 apresentam-se as principais conclusões do trabalho.

## **2. COMPORTAMENTO DE ELEMENTOS DE BETÃO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO - ESTADO DA ARTE**

### **2.1. INTRODUÇÃO**

Apesar de alguns avanços verificados no estudo do comportamento de elementos de betão armado em situação de incêndio, esses avanços ainda não colmataram todas as lacunas existentes nesta matéria. Mesmo a nível dos códigos normativos, é feita uma abordagem ainda incompleta da matéria. Como exemplo pode-se indicar o Eurocódigo 2 Parte1-2 que, mesmo sendo específico para estruturas em situação de incêndio, não dá especificações suficientes em algumas matérias, nomeadamente na verificação de segurança ao corte de elementos de betão armado.

Os maiores avanços verificados têm sido a nível das propriedades dos materiais, principalmente o betão e o aço, a nível da quantificação das ações, quer as térmicas como as mecânicas, e a nível do desenvolvimento dos métodos de análise e de dimensionamento, nomeadamente os métodos simplificados e alguns métodos avançados.

A nível das propriedades dos materiais, o EC2-1-2, especifica, tanto do betão como para o aço, as propriedades térmicas e mecânicas. As principais propriedades, já estudadas, com grande influência no comportamento do material e da estrutura aqui especificadas são as resistências à compressão e à tração, as extensões térmicas e a condutividade térmica tanto para o aço como para o betão.

Dada a variação temporal de temperatura dos materiais em situação de incêndio e dos seus comportamentos, os métodos de cálculo de estruturas em situação de incêndio são de elevada complexidade. Desta forma podem ser encontrados no EC2-1-2 alguns métodos de cálculo, tais como os métodos simplificados ou os cálculos feitos com base em Valores Tabelados.

Os Valores Tabelados apresentados no EC2-1-2 foram obtidos com base em experiências empíricas acumuladas por especialistas na matéria [1], podendo-se ver aqui a dificuldade e a evolução que o cálculo ao fogo tem tido.

Os métodos de cálculo simplificados para estruturas de betão em situação de incêndio baseiam-se principalmente na redução das secções e das propriedades dos materiais, de acordo com a temperatura a que estiverem sujeitas ao longo do tempo. Estas temperaturas são obtidas por Curvas de Incêndio devidamente especificadas. Dos métodos de cálculo simplificados presentes nos regulamentos, aqui é apresentado o Método da Isotérmica dos 500°C e o Método das Zonas.

Sabendo que os métodos simplificados podem não estimar com grande rigor o comportamento das estruturas em situação de incêndio têm surgido alguns métodos de cálculo avançados, que além de

deram a possibilidade de fazer as análises térmicas e mecânicas, também permitem estimar o comportamento das estruturas no seu todo (ou em partes relevantes).

## 2.2. Propriedades dos materiais em situação de incêndio

O comportamento de elementos de betão armado em situação de incêndio é condicionado pelo comportamento dos materiais que constituem esses elementos, daí ser de grande importância conhecer as principais propriedades termomecânicas dos referidos materiais.

De entre os materiais que constituem o betão armado, nesse subCapítulo falar-se-á do betão e do aço por terem maior influência na segurança de elementos de betão armado quer quando estas estão à temperatura ambiente como quando se encontram em situação de incêndio.

Serão abordadas as propriedades termomecânicas com maior influência a nível do desempenho estrutural dos dois materiais acima referidos, aço e betão, tais como a sua resistência à tração e à compressão, as suas extensões e módulos de elasticidade, a sua condutividade térmica e o calor específico.

De acordo com a NP EN 1992-1-2, o valor de cálculo da resistência mecânica do material é obtida de acordo com Expressão seguinte [1]:

$$X_{d,fi} = \frac{k_{\theta} \times X_k}{\gamma_{M,fi}} \quad (2.1)$$

Portanto, em situação de incêndio, as propriedades mecânicas dos materiais são definidas a partir do valor característico da propriedade em causa,  $X_k$ , à temperatura ambiente, aplicando o coeficiente parcial de segurança em situação de incêndio,  $\gamma_{M,fi}$ , e o fator de redução da propriedade em causa,  $k_{\theta}$ , para ter em conta o efeito térmico do aquecimento provocado pelo incêndio.

Os valores de cálculo das propriedades térmicas são dados pela Equações (2.2-2.3) proposta no Eurocódigo 2 [1]:

- Se o aumento da propriedade térmica for favorável para a verificação da segurança a Expressão a adaptar é:

$$X_{d,fi} = \frac{X_k}{\gamma_{M,fi}} \quad (2.2)$$

- Caso contrário a Expressão será:

$$X_{d,fi} = k_{\theta} \times \gamma_{M,fi} \quad (2.3)$$

Em situação de incêndio, para o betão e o aço, a NP EN 1992-1-2 define valores do coeficiente parcial de segurança,  $\gamma_{M,fi}$ , com valor unitário



O valor característico das propriedades dos materiais depende de temperatura a que o material estiver sujeito, mudando de acordo com a alteração de temperatura. O EC2-1-2 propõe Expressões que permitem determinar o valor característico de acordo com a alteração de temperatura, que serão a seguir indicados, para o aço e o betão.

## 2.2.1. Betão

Sob o ponto de vista do comportamento ao fogo, o betão apresenta características que, até uma determinada temperatura, permitem ter um bom comportamento no que se refere a perda da capacidade resistente. Algumas dessas características são a incombustibilidade e a sua reduzida capacidade de transmissão térmica.

Dado a composição do betão, principalmente por agregados e pasta cimento, o aumento de temperatura provoca alteração físico-química em cada um desses componentes, alterando dessa forma as suas propriedades. Essa alteração é cada vez mais agravada quando maior o aumento de temperatura, porque, se por um lado, na pasta de cimento endurecido, o aumento de temperatura provoca a evaporação da água e influencia a desidratação dos hidratos que formam a matriz cimentícia, por outro lado, os agregados quando submetidos a altas temperaturas sofrem expansões térmicas que podem ser destrutivos para o betão [2].

A seguir serão pormenorizadas as características termomecânicas do betão, tratando-as de maneira separada.

### 2.2.1.1. Propriedades térmicas e físicas

As principais propriedades térmicas do betão com maior importância são: a condutividade térmica, a extensão térmica, o calor específico, a densidade e a difusividade térmica.

Neste trabalho o comportamento térmico dos elementos de betão armado é determinado por meio de programa de cálculo avançado (o SAFIR), que será posteriormente detalhado, capaz de ter em conta grande parte dessas características.

- O EC2-1-2 indica que a condutividade térmica do betão pode ser determinada entre valores de limites inferior e superior [1], como a seguir é apresentada nas Equações 2.4 e 2.5 (para limites superior e inferior respetivamente) e para betão de massa volúmica normal.

$$\lambda_c = 2 - 0,2451 \times (\theta/100) + 0,0107 \times (\theta/100)^2 \text{ W/m.K Para } 20^\circ \text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ \text{C} \quad (2.4)$$

$$\lambda_c = 1,36 - 0,136 \times (\theta/100) + 0,0057 \times (\theta/100)^2 \text{ W/m.K Para } 20^\circ \text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ \text{C} \quad (2.5)$$

Onde  $\lambda_c$  é a condutividade térmica do betão e  $\theta$  é a temperatura em °C

Esses mesmos limites são apresentados na Figura 2.1, a baixo, onde é visível a diminuição da condutividade térmica com o aumento de temperatura.

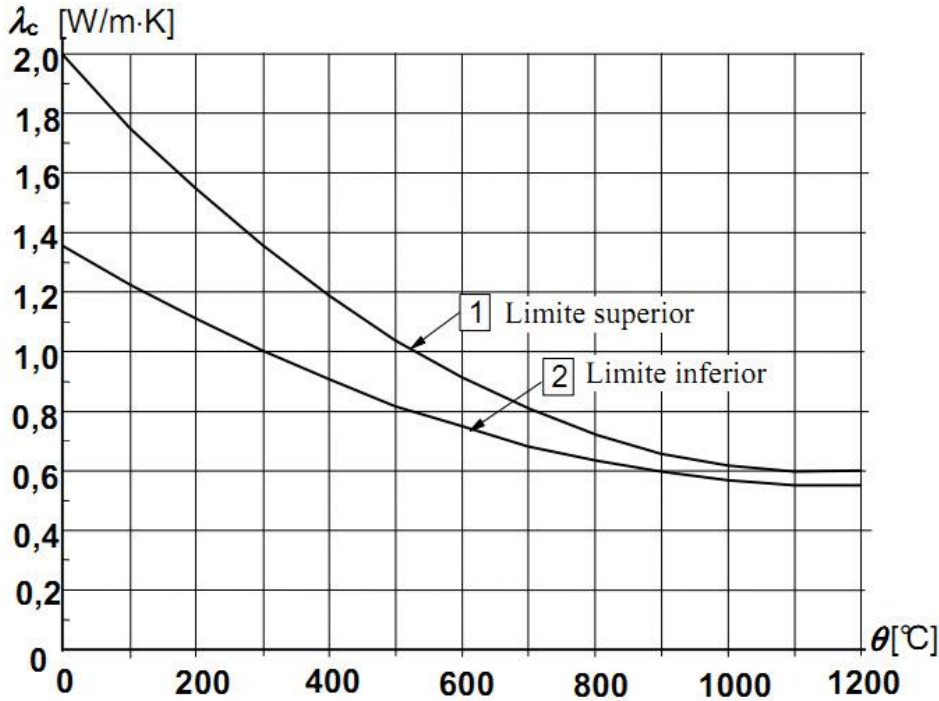


Figura 2.1: Condutividade térmica do betão [1]

- De acordo com Harmathy, citado por [2], “o calor específico de um material pode ser definido como a energia absorvida ou libertada pelo material em virtude de ter ocorrido um aumento de temperatura, ou uma mudança de fase acompanhada de uma reação endotérmica”. O EC2-1-2 propõe fórmulas, (2.6), para determinar o calor específico,  $c_p(\theta)$ , do betão seco, ( $u=0\%$ ), para agregados siliciosos e calcários, em função da variação de temperatura em cada intervalo.

$$\begin{aligned}
 c_p(\theta) &= 900, \text{ para } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100^\circ\text{C} \\
 c_p(\theta) &= 900 + (\theta - 100), \text{ para } 100^\circ\text{C} < \theta \leq 200^\circ\text{C} \\
 c_p(\theta) &= 1000 + (\theta - 200)/2, \text{ para } 200^\circ\text{C} < \theta \leq 400^\circ\text{C} \\
 c_p(\theta) &= 1100, \text{ para } 400^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

Com  $\theta$  a temperatura do betão em  $^\circ\text{C}$  e  $c_p(\theta)$  em  $\text{J/kg K}$ .

O EC2-1-2 refere ainda que quando não se considera explicitamente o teor de água no método de cálculo, a função indicada para o calor específico do betão com agregados siliciosos ou calcários pode ser modelada valor constante e,  $c_{p, \text{peak}}$ , apresentado a baixo, situado entre os  $100^\circ\text{C}$  e os  $115^\circ\text{C}$ , e decrescendo linearmente entre os pontos ( $115^\circ\text{C}$ ,  $c_{p, \text{peak}}$ ) e ( $200^\circ\text{C}$ ,  $1000 \text{ J/kg K}$ ) [1].

$c_{p, \text{peak}} = 900 \text{ J/kg K}$  para uma humidade de 0% do peso do betão

$c_{p, \text{peak}} = 1470 \text{ J/kg K}$  para uma humidade de 1,5% do peso do betão

$c_{p, \text{peak}} = 2020 \text{ J/kg K}$  para uma humidade de 3,0% do peso do betão

Na Figura 3.9 é apresentada as funções do calor específico do betão,  $c_p$ , para percentagens de humidade de 0%, 1,5% e 3%.

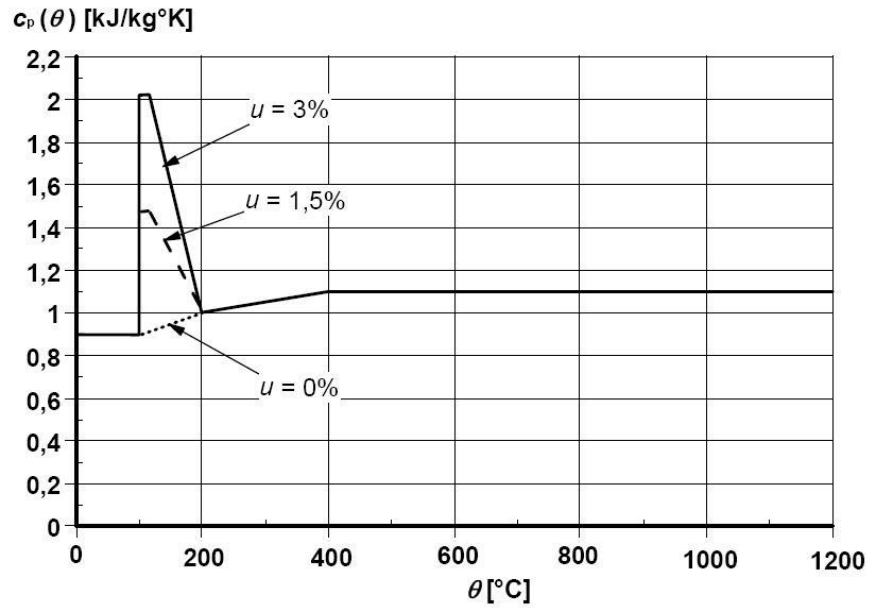


Figura 2.2: Evolução do calor específico com a temperatura e com a humidade do betão [1]

- A dilatação térmica do betão é fortemente influenciada pela expansão térmica dos seus componentes e alterações químicas na pasta de cimento. Dos elementos constituintes do betão, a expansão térmica do agregado ocorre com a temperatura até aos 600°C enquanto a extensão térmica do cimento endurecido ocorre aos 150°C [2]

Para o cálculo da extensão térmica do betão o EC2-1-2 propõe a utilização das Expressões 2.7 e 2.8, para agregados siliciosos e 2.9 e 2.10, para agregados calcários.

$$\varepsilon_c = -1,8 \times 10^{-4} + 9 \times 10^{-6} \times \theta + 2,3 \times 10^{-11} \times \theta^3 \text{ para } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 700^\circ\text{C} \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_c = 14 \times 10^{-3} \text{ para } 700^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C} \quad (2.8)$$

$$\varepsilon_c = -1,2 \times 10^{-4} + 6 \times 10^{-6} \times \theta + 1,4 \times 10^{-11} \times \theta^3 \text{ para } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 805^\circ\text{C} \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_c = 12 \times 10^{-3} \text{ para } 805^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C} \quad (2.10)$$

- A difusividade térmica do betão diminui com o aumento de temperatura. Os fatores que mais influenciam a diminuição da difusividade são a dimensão, a natureza e o volume do agregado e a relação água-cimento [2].

### 2.2.1.2. Propriedades mecânicas

O betão possui uma boa resistência à compressão comparativamente com a resistência à tração. Mas quando sujeito a alta temperatura, durante um certo período de tempo, essas resistências diminuem.

- A capacidade resistente à compressão de betões submetidos a temperaturas elevadas é influenciada por fatores como o tipo de agregado, a taxa de evaporação da água e o nível de carregamento.

Na Tabela 2.1, extraída do EC2-1-2, o betão começa a perder a sua capacidade resistente à compressão a partir dos 200°C. Essa perda é mais agravada nos betões de massa volume normal com agregados siliciosos do que com agregados calcários. À medida que a temperatura aumenta, a diminuição da capacidade resistente à compressão é maior, até chegar mesmo a perda da total capacidade de resistente.

Essa perda de capacidade é materializada pelo fator de redução,  $k_c(\theta)$ , apresentada na Tabela a baixo. Quando os valores não forem coincidentes com os da Tabela pode-se fazer uma interpolação linear para a obtenção do fator de redução do betão [1].

Tabela 2.1: Coeficiente de redução à compressão ( $k_c(\theta)$ ) do betão e extensões ( $\epsilon_{c,\theta}$ ) [1]

Temperatura do Betão (°C)	Agregados siliciosos			Agregados calcários		
	$k_c(\theta)$	$\epsilon_{c1,\theta}$	$\epsilon_{cu1,\theta}$	$k_c(\theta)$	$\epsilon_{c1,\theta}$	$\epsilon_{cu1,\theta}$
20	1,0000	0,0025	0,0200	1,0000	0,0025	0,0200
100	1,0000	0,0040	0,0225	1,0000	0,0040	0,0225
200	0,9500	0,0055	0,0250	0,9700	0,0055	0,0250
300	0,8500	0,0070	0,0275	0,9100	0,0070	0,0275
400	0,7500	0,0100	0,0300	0,8500	0,0100	0,0300
500	0,6000	0,0150	0,0325	0,7400	0,0150	0,0325
600	0,4500	0,0250	0,0350	0,6000	0,0250	0,0350
700	0,3000	0,0250	0,0375	0,4300	0,0250	0,0375
800	0,1500	0,0250	0,0400	0,2700	0,0250	0,0400
900	0,0800	0,0250	0,0425	0,1500	0,0250	0,0425
1000	0,0400	0,0250	0,0450	0,0600	0,0250	0,0450
1100	0,0100	0,0250	0,0475	0,0200	0,0250	0,0475
1200	0,0000			0,0000		

A resistência do betão à compressão em situação de incêndio,  $f_{ck,fi}$ , é igual a tensão característica do betão à compressão à temperatura ambiente,  $f_{ck}$ , multiplicada pelo fator de redução,  $k_c(\theta)$ , apresentada na Tabela 2.1 por forma a considerar a perda da resistência provocada pelo aumento de temperatura

- A capacidade do betão em resistir a trações em situação de incêndio geralmente não é considerada, mas quando for considerada o fator de redução da resistência característica do betão à tração pode ser determinada usando a seguinte Expressão:

$$f_{cd,t} = k_{c,t}(\theta) \times f_{ck,t} \quad (2.11)$$

Sendo que  $k_{c,t}(\theta)$  toma valor unitário para temperatura entre os 20°C e os 100°C e para temperaturas a partir dos 100°C até aos 600°C, obedecem à Equação 2.12

$$k_{c,t}(\theta) = 100 - 1 \times (\theta - 100) / 500 \quad (2.12)$$

Pode-se constatar na Figura 2.3 que, contrariamente ao comportamento do betão à compressão, o betão em temperaturas elevadas começa a perder a sua capacidade resistente à tração mais cedo, a partir dos 100°C, essa capacidade se anula nos 600°C [1], daí que a sua resistência à tração, geralmente, não é considerada.

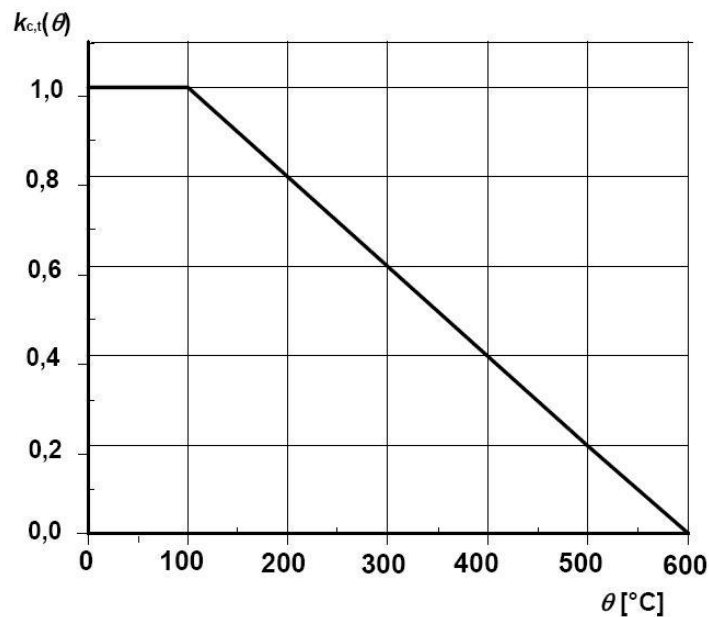


Figura 2.3: Coeficiente de redução da tensão de rotura do  
betão à tração a temperaturas elevadas

No entanto outros estudos levados a cabo por Xie (1998) e Zhang (2001) sobre a resistência à tração do betão em situação de incêndio mostram que ainda acima dos 600°C, o betão resiste à tração. Nesses estudos a resistência à tração foi avaliada por meio de ensaio de tração por compressão diametral [3].

Na Figura 2.4 é apresentada uma comparação do valor de resistência do betão à tração feita em diferentes estudos e a apresentada pelo EC2-1-2.

O EC2-1-2 indica que a partir dos 600°C o betão não resiste à tração enquanto nos estudos de Xie (1998) e Zhang (2001) mostram que a essa temperatura o betão ainda apresenta uma resistência.

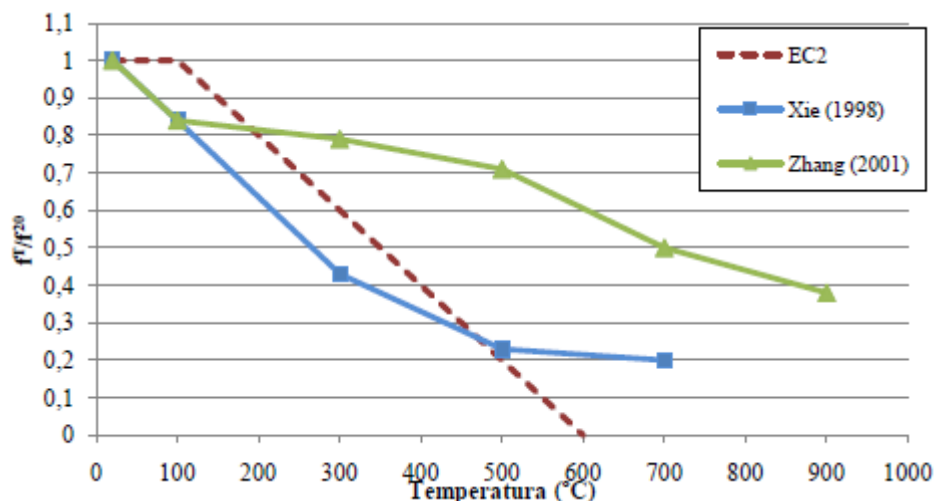


Figura 2.4: Redução da resistência à tração por compressão diametral do betão com a temperatura [3]

### 2.2.2. Aço

De acordo com as Curvas de Incêndio apresentadas na Figura 2.9 verifica-se que, geralmente, a temperatura máxima atingida por um incêndio (em edifícios) é da ordem dos 1200°C. O aço é fundido a uma temperatura de aproximadamente 1550°C, portanto, em situação de incêndio um edifício dificilmente fundirá.

Por ter uma maior capacidade de condução térmica que o betão e por estar localizado numa zona de maior exposição ao fogo, a temperatura nas armaduras de betão armado tende a uniformizar-se ao mesmo tempo que o aço e a sua vizinhança tendem a aquecer condicionando assim a segurança estrutural do elemento em situação de incêndio.

Até aos 400°C as propriedades resistentes do aço mantêm-se praticamente inalteráveis, acima dessa temperatura existe uma significativa diminuição da capacidade resistente.

#### 2.2.2.1. Propriedades térmicas e físicas

Algumas das propriedades térmicas do aço a temperaturas elevadas têm pouca influência na capacidade resistente, visto que em alguns casos nem são alterados pela temperatura e noutros casos readquirem os valores com o abaixamento da temperatura.

- A massa volúmica do aço não se altera com o aumento de temperatura, mantendo-se nos 7850 kg/m<sup>3</sup> porque possui uma microestrutura cristalina bem definida e estável em temperaturas elevadas.
- No que se refere ao calor específico, o ferro perde as suas propriedades magnéticas no aquecimento e as adquire no arrefecimento (Figura 2.5), a uma temperatura de 735°C, também conhecida por “ponto de Curie” [4].

Tal como o proposto no Eurocódigo 3 [5], na Equação 2.13 e na Figura 2.5, verifica-se o crescimento do calor específico até atingir o “ponto Curie” para depois baixar manter-se estável até aos 1200°C.

$$\begin{aligned}
 c_a(\theta) &= 425 + 7,73 \times 10^{-1} \times \theta - 1,69 \times 10^{-3} \times \theta^2 + 2,22 \times 10^{-6} \times \theta^3, \text{ para } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 600^\circ\text{C} \\
 c_a(\theta) &= 666 + \frac{13002}{738 - \theta}, \text{ para } 600^\circ\text{C} < \theta \leq 735^\circ\text{C} \\
 c_a(\theta) &= 545 + \frac{17820}{\theta - 731}, \text{ para } 735^\circ\text{C} < \theta \leq 900^\circ\text{C} \\
 c_a(\theta) &= 650, \text{ para } 900^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

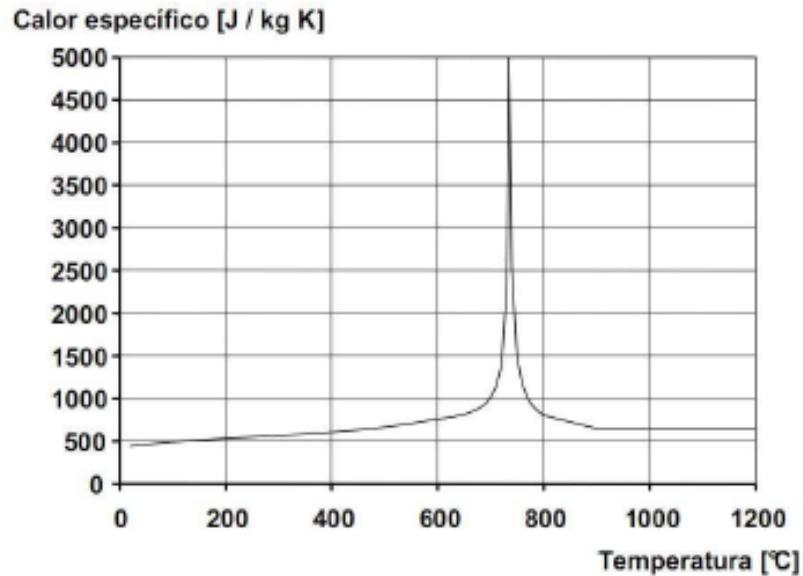


Figura 2.5: Evolução do calor específico do aço em função de temperatura [5]

- O aço possui uma condutividade térmica elevada, sendo igual quer ele seja laminado a quente ou trabalhado a frio.

Para a determinação da condutividade térmica do aço, pode-se usar a Equação 2.14 [5], onde pode-se constatar que o aço carbono possui uma elevada condutividade térmica até ao 1000°C, mantendo-se esta constante a partir desse valor.

$$\begin{aligned}
 \lambda_a &= 54 - 3,33 \times 10^{-2} \times \theta, \text{ para } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 800^\circ\text{C} \\
 \lambda_a &= 27,3, \text{ para } 800^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

#### 2.2.2.2. Propriedades mecânicas

As estruturas de aço em situação de incêndio possuem um pior desempenho do que as estruturas de betão. Por um lado algumas características térmicas do aço, tais como a sua elevada condutividade, podem diminuir substancialmente a resistência do material.

Por outro lado esse problema é agravado pelo facto de nas estruturas de betão armado geralmente o aço se encontrar mais exposto (caso seja protegido só pelo recobrimento) ao incêndio e ao aumento das temperaturas.

- As propriedades de resistência à tração e a deformação do aço para betão armado são propostas no EC2-1-2, podendo ser obtidas a partir das relações tensões - extensões, Figura 2.6 e na Tabela 2.2.

Na Figura 2.6,  $E_{s,\theta}$ , é o módulo de elástico linear,  $f_{sp,\theta}$ , é a tensão limite de proporcionalidade e  $f_{sy,\theta}$ , a tensão máxima [1]. Nessa mesma Figura pode-se dividir o comportamento do aço em situação de incêndio em quatro etapas. Na primeira verifica-se que o aço ainda possui um comportamento linear, portando ainda é válida a lei de Hooke, na fase seguinte já passa a ter um comportamento não linear até atingir o patamar de cedência, onde as extensões são bastante elevadas, para por fim, ter um decréscimo rápido da resistência até atingir a rotura.

- Na Tabela 2.2 é possível verificar que o fator de redução do aço  $k_s(\theta)$  (obtido pela relação entre  $f_{sy,\theta}/f_{yk}$ ) mantem-se constante e de valor unitário até aos 400°C.

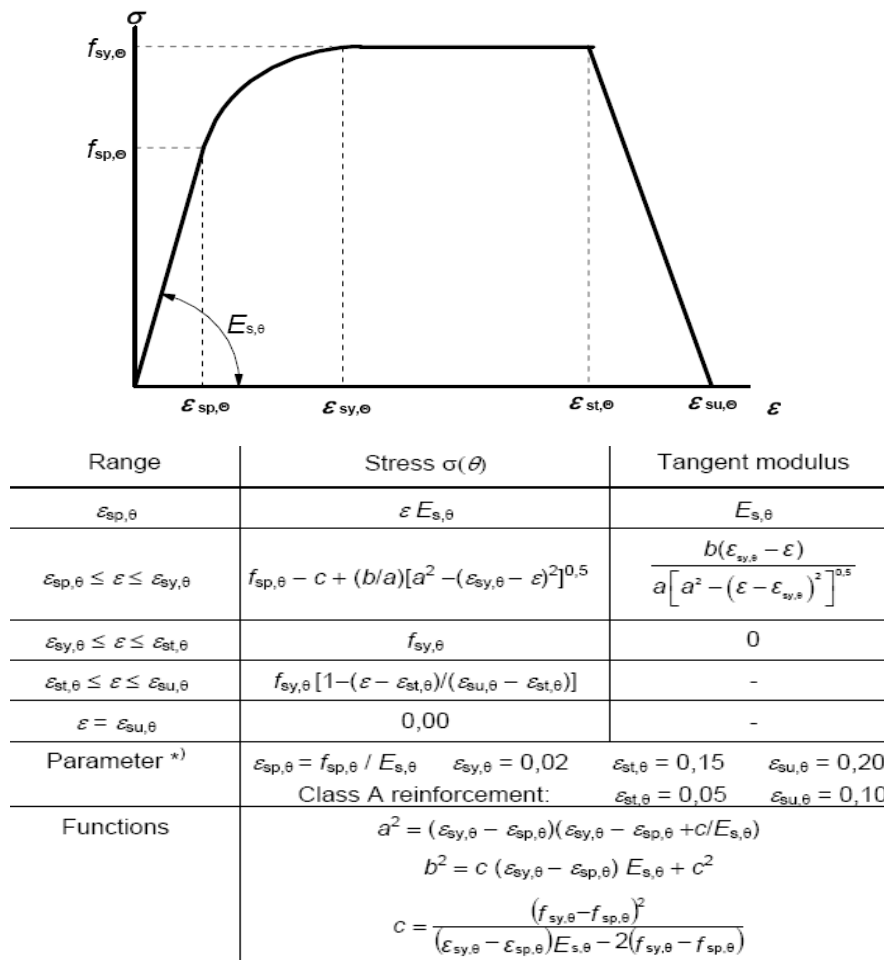


Figura 2.6: Modelo para a relação tensões – extensões para aços

para betão armado e pré-esforçado a temperaturas elevadas [1]



Tabela 2.2: Valores dos parâmetros da relação tensão – extensão do aço (classe N) para betão armado a temperaturas elevadas

Temperatura do Aço ( $\theta$ , °C)	$k_s(\theta)$		$E_{s,\theta}/E_s$	
	L. Q	E.F	L. Q	E.F
20	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	0,96
200	1,00	1,00	0,90	0,92
300	1,00	1,00	0,80	0,81
400	1,00	0,94	0,70	0,63
500	0,78	0,67	0,60	0,44
600	0,47	0,40	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,07	0,05
1000	0,04	0,05	0,04	0,03
1100	0,02	0,03	0,02	0,02
1200	0,00	0,00	0,00	0,00

- A extensão térmica do aço possui um maior interesse prático nos casos em que as ligações possam impedir total ou parcialmente a dilatação térmica. O EC2-1-2 [1], sugere que sejam utilizadas as Expressões (2.15) na determinação da extensão térmica de aços para betão armado. Na Figura 2.7 nota-se o crescente aumento da extensão térmica com temperatura, com exceção ao intervalo entre 750°C aos 860°C, onde permanece constante.

$$\varepsilon_s = -2,416 \times 10^{-4} + 1,2 \times 10^{-5} \times \theta + 0,4 \times 10^{-8} \times \theta^2 \text{ para } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 750^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon_s = 11 \times 10^{-3} \text{ para } 750^\circ\text{C} < \theta \leq 860^\circ\text{C} \quad (2.15)$$

$$\varepsilon_s = -6,2 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-5} \times \theta \text{ para } 860^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}$$

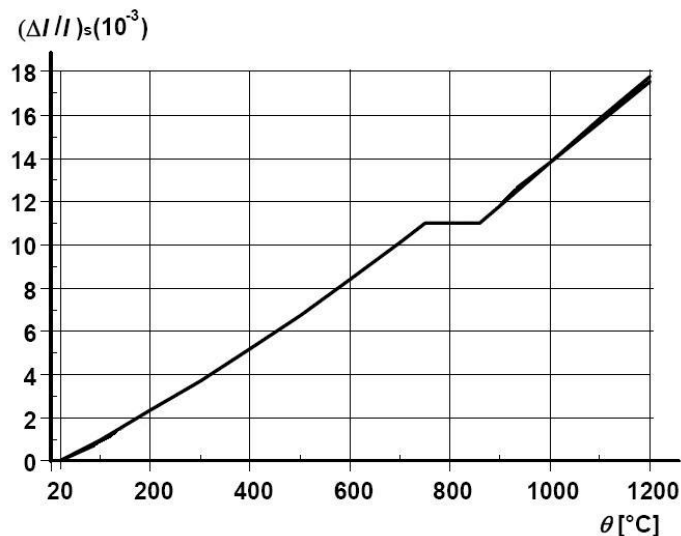


Figura 2.7: evolução da extensão térmica com a temperatura

### 2.3. AÇÕES TÉRMICAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Em situação de incêndio a ação térmica é excecional e deve ser considerada no projeto estrutural. De acordo com o Eurocódigo 1-1-2, [6] as ações térmicas são definidas pelo fluxo de calor efetivo na superfície do elemento e nas superfícies expostas ao fogo. O fluxo de calor efetivo deve ser determinado considerando a transferência de calor por convecção e por radiação. O mesmo código indica ainda que na análise estrutural, para a verificação da resistência ao fogo deve-se ter em conta a seleção do cenário de incêndio de cálculo relevantes, a determinação dos incêndios de cálculo correspondentes, o cálculo da evolução de temperatura no interior dos elementos estruturais e o cálculo do comportamento mecânico da estrutura exposta ao fogo.

Para a seleção do cenário de incêndio deve-se ter em atenção fatores como, o material combustível presente no compartimento (carga de incêndio), a geometria do compartimento (ambiente delimitado por paredes, pisos, etc, que limitam a propagação do sinistro para vizinhanças), a ventilação, e as propriedades térmicas que compõe os elementos da compartimentação [4].

#### 2.3.1. CURVAS DE INCÊNDIO

As Curvas de Incêndio são modelos matemáticos que foram formulados para descreverem a variação de temperatura do compartimento em função do tempo do incêndio, permitindo estimar a máxima temperatura dos gases quentes no ambiente de chamas [7]

Dado diversidade das situações de incêndio possíveis é difícil prever com precisão uma curva definidora do incêndio de cálculo que correspondesse ao incêndio real. Dessa forma na modelação do fogo tenta-se obter uma aproximação á Curva de Incêndio natural e para esse efeito existem dois tipos de Curvas de Incêndio, as curvas nominais e as curvas paramétricas.

### 2.3.1.1. Curvas de Incêndio natural

Para ocorrência do fogo é necessário a existência simultânea de uma fonte de calor, do combustível e do oxigénio.

A Curva de Incêndio natural é caracterizada pelo registo de temperatura dos gases em função do tempo de duração do incêndio. Esta curva possui dois ramos, um ascendente, representando a evolução de temperatura e o descendente, que traduz o resfriamento de temperatura com o tempo de duração do incêndio [4]. Os ramos ascendentes e descendentes possuem sub-bases, sendo essas duas fases separadas pelo ponto de temperatura máxima, designada de *flashover*.

Na Figura 2.8, pode-se observar a curva tipo de um incêndio natural, com quatro fases distintas [4]:

- A ignição ou fase inicial - Fase onde as temperaturas ainda não influenciam o comportamento estrutural, onde inicia o aquecimento, com libertação de gases tóxicos e entrada em funcionamento de dispositivos de prevenção ativa;
- *Pré-flashover* – caracterizada por uma aceleração no aumento de temperatura;
- *Flashover* – É um período de curta duração a partir da qual todo o compartimento é tomado pelas chamas. Essa fase é também conhecida por instante de inflação generalizada.
- *Pós-flashover* – Caracterizada por uma mudança súbita de crescimento de temperatura, provocando um incêndio generalizado a todo o compartimento. Nessa etapa a temperatura dos gases é superior a 300°C, crescendo rapidamente até atingir a temperatura máxima;
- Resfriamento – Região onde há uma redução gradativa de temperatura dos gases do ambiente, após a completa extinção do material combustível no compartimento.

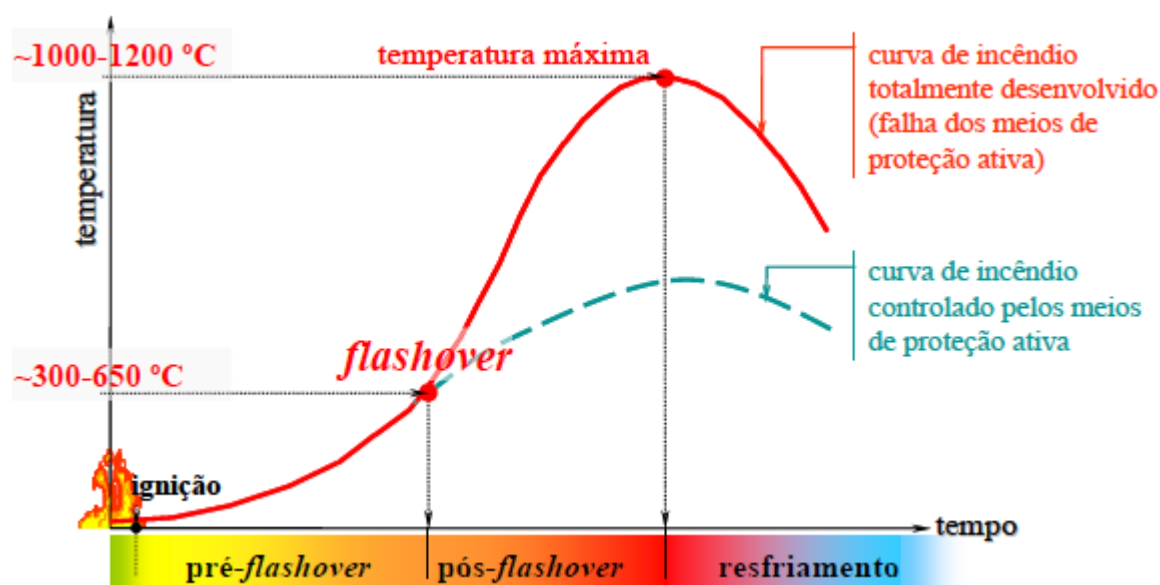


Figura 2.8: Principais estágios de um incêndio Natural [7]

### 2.3.1.2. Curvas Nominais

A curva nominal é destinada a representar um modelo de um incêndio totalmente desenvolvido num compartimento. O EC1-1-2 define três tipos diferentes de curvas nominais. A Curva de Incêndio Padrão, Curvas de Incêndio para elementos exteriores e Curvas de Incêndio de hidrocarbonetos.

- Curva de Incêndio Padrão ISO 834 – A Curva de Incêndio Padrão é definida pela seguinte Expressão (2.16):

$$\theta(t) = 20 + 345 \times \log(8 \times t + 1,1) \quad (2.16)$$

- Curva de Incêndio em elementos exteriores - Relação temperatura tempo nominal aplicável à face exterior de paredes exteriores, que podem ser expostas ao fogo a partir de diferentes zonas da fachada, isto é, diretamente a partir do interior do respetivo compartimento de incêndio ou a partir de um compartimento localizado por baixo ou ao lado da parede exterior considerada. Esta curva é determinada usando a Expressão 2.17.

$$\theta(t) = 20 + 660 \times (1 - 0,687 \times e^{(-0,32 \times t)} - 0,313 \times e^{(-3,8 \times t)}) \quad (2.17)$$

- Curva de Incêndio de hidrocarbonetos- Relação nominal temperatura-tempo destinada a representar os efeitos de um incendio tipo hidrocarbonetos e determinada com a Expressão 2.18.

$$\theta(t) = 20 + 1080 \times (1 - 0,325 \times e^{(-0,167 \times t)} - 0,675 \times e^{(-2,5 \times t)}) \quad (2.18)$$

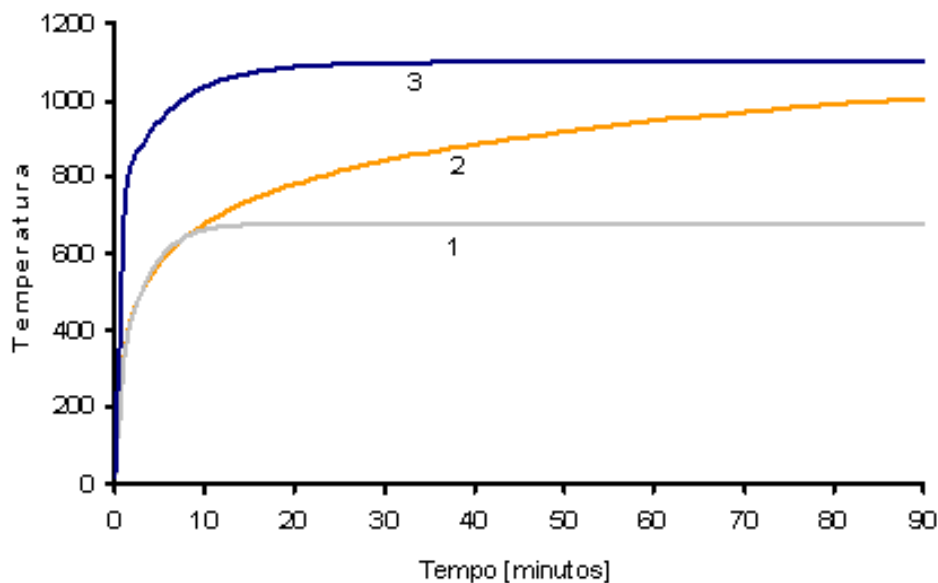


Figura 2.9: Curvas de Incêndio nominal

- 1- Curva de Incêndio de elementos exteriores; 2- Curva de Incêndio Padrão; 3- Curva de Incêndio de hidrocarbonetos.

Analisando as três Curvas de Incêndio nominais (Figura 2.9), nota-se que a Curva de Incêndio Padrão cresce sempre com o aumento do tempo de fogo, o que não acontece na realidade. As outras duas curvas crescem até atingir um valor máximo a partir da qual se estabilizam.

O EC1-1-2 recomenda que se utiliza a Curva de Incêndio Padrão (ISO 834:1975) na determinação da resistência ao fogo de elementos de betão armado.

Ao comparar a Curva de Incêndio natural com a Curva de Incêndio Padrão, verifica-se que a última não possui uma fase de arrefecimento, que é a fase onde grande parte das estruturas podem atingir a rotura, porque é nessa fase que há uma diminuição da ductilidade dos materiais ao mesmo tempo que as mesmas tentam retrair-se (por causa da diminuição de temperatura) sendo impedidos pela estrutura podendo levar assim a rotura.

### 2.3.1.3. Curvas Paramétricas

O EC1-1-2, no seu anexo A [6], define de forma detalhada as Curvas de Incêndio paramétricas através de expressões que permitem traçar tanto a fase de aquecimento como de arrefecimento dessa curva.

Assim como as curvas nominais, as curvas paramétricas reproduzem a evolução de temperatura dos gases no compartimento ao longo da duração do incêndio, a diferença é que as últimas entram em consideração os fatores físicos, tais como as condições de ventilação, a densidade da carga de incêndio e as propriedades dos elementos envolventes do compartimento. Estas curvas também possuem uma fase de extinção.

No que se refere a carga de incêndio, quando maior for maior será a duração do incêndio. A existência de grandes aberturas para a ventilação pode provocar a rapidez do incêndio tornando-o ainda mais perigoso. Se os elementos envolventes do compartimento forem capazes de absorver a energia, limitam as temperaturas de incêndio.

### 2.3.2. COMBINAÇÃO DE AÇÕES

De acordo com o Eurocódigo 1, em situação de incêndio, para o dimensionamento de estruturas, além das ações mecânicas, torna-se necessário definir as ações térmicas.

A ação do fogo é considerada uma ação de acidente, sendo que os efeitos das ações em situação de incêndio,  $E_{d,fi,t}$ , podem ser determinados para valores quase-permanentes ou frequentes das ações variáveis. O EC1- 1-2 recomenda a utilização de valores quase-permanentes da ação variável, em que os efeitos da ação do fogo,  $E_{d,fi,t}$ , são calculados da seguinte forma:

$$E_{fi,d,t} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + A_d + \psi_{2,1} \times Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \times Q_{k,i} \quad (2.19)$$

Sendo:

- $G_{k,j}$  = Valor característico das ações permanentes;
- $Q_{k,1}$  = Valor característico da ação variável principal ou dominante;
- $Q_{k,i}$  = Valor característico da ação variável acompanhante  $i$ ;
- $A_d$  = Valor de cálculo da ação accidental. Nas situações de incêndio, este valor representa o valor de cálculo das ações térmicas indiretas devido ao incêndio.
- $\psi_2$  - Coeficiente para determinação do valor quase permanente de uma ação variável.

Quando as deformações térmicas que sugerem nos elementos de betão armado em situação de incêndio forem restringidas, podem conduzir ao aparecimento de ações indiretas nas estruturas. Para ter em conta essas ações indiretas o EC1-1-2 indica os parâmetros que permitam fazer a avaliação dessas ações e estão indicadas a baixo [6].

- Dilatação térmica restringida dos próprios elementos;
- Dilatação térmica diferenciada no interior de elementos hiperestáticos (caso de lajes contínuas);
- Dilatação térmica de elementos adjacentes (por exemplo os deslocamentos das extremidades dos pilares devidos à expansão das lajes);
- Dilatação térmica de elementos capazes de afetar outros elementos fora do compartimento de incêndio;
- Gradientes térmicos no interior das secções provocando esforços internos.

No entanto no mesmo Eurocódigo (EC1-1-2) na secção 4.1 é indicado que os efeitos indiretos resultantes das deformações e dilatações, impostas e restringidas podem ser dispensados no caso em que esses efeitos possam ser reconhecidos à priori como sendo desprezáveis ou favoráveis, ou no caso em que sejam tidos em conta por condições de apoio e de fronteira escolhidos de forma conservativo. Também é indicado que quando é utilizado a Curva de Incêndio Padrão, atrás apresentada, não é necessário considerar os efeitos das ações indiretas [6].

O EC2-1-2, também dá algumas indicações para não considerar os efeitos das ações indiretas. Na secção 2.1.1 ponto (4) indica que não é necessário considerar as deformações nas estruturas resistentes, caso os meios de proteção sejam eficientes ou no caso em que os elementos constituintes da estrutura satisfaçam os requisitos relativos a exposição ao fogo nominal. Um outro ponto do EC2-1-2, onde também é referido a dispensa das ações indiretas, é a secção 2.4. onde é dito que uma análise por elementos é suficiente para a verificação da resistência ao fogo e que é apenas necessário considerar os efeitos das ações térmicas provocadas pelos gradientes térmicos na secção transversal, sendo que pode ser dispensado os efeitos das dilatações térmicas axiais ou no próprio plano [1].

De acordo com as considerações feitas a cima e de forma a simplificar a análise, nota-se que o Eurocódigo aponta para uma análise separada de elementos e não da estrutura no seu todo ou parte dela, e dá indicação clara para não considerar as ações indiretas. Dessa forma efeitos da ação do fogo,  $E_{d,fi,t}$ , passam a ser determinados de acordo com a Expressão 2.20.

$$E_{fi,d,t} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \psi_{2,1} \times Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \times Q_{k,i} \quad (2.20)$$

Para não se considerar os efeitos das ações indiretas o Eurocódigo considera que o incêndio atua no edifício completo, considerando que todo o edifício encontra-se submetido ao Incêndio Padrão. Se o incêndio estiver a atuar no único compartimento (Figura 2.10 a)) os efeitos das ações indiretas são maiores do que se o mesmo estiver a atuar no edifício completo (Figura 2.10 b)) [8].

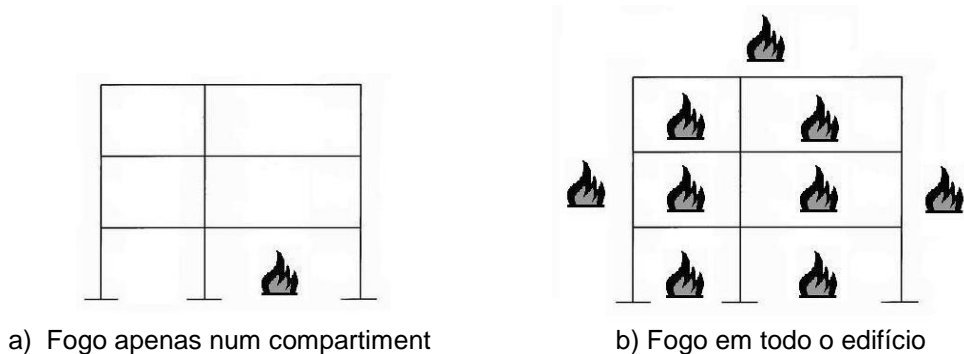


Figura 2.10: Possíveis situações de incêndio num edifício [8].

De forma a simplificar os cálculos o EC2-1-2, permite obter o valor dos efeitos das ações em situação de incêndio,  $E_{d,fi,t}$ , a partir dos efeitos das ações à temperatura ambiente. A Expressão proposta para efetuar esse cálculo é a seguir indicada:

$$E_{d,fi,t} = \eta_{fi} \times E_d \quad (2.21)$$

Onde  $E_d$  o valor de dimensionamento dos efeitos das ações resultantes da combinação de estado limite último à temperatura ambiente e  $\eta_{fi}$  um fator de redução, dada pela Expressão 2.22.

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{2,1} \times Q_{k,1}}{\gamma_G \times G_k + \gamma_{Q,1} \times Q_{k,1}} \quad (2.22)$$

Sendo  $\gamma_G$ , o coeficiente de segurança para a ação permanente e  $\gamma_{Q,1}$ , coeficiente de segurança para a ação variável

O fator de redução  $\eta_{fi}$  é influenciado pelo fator de carga  $\xi = Q_{k,1}/G_k$  e pelo coeficiente de combinação  $\psi_{2,1}$ . No EC2-1-2 é indicada alguns valores, dependentes das características a cima indicadas, para os coeficientes parciais de segurança ( $\gamma_G=1,35$  e  $\gamma_Q=1,5$ ), Figura 2.11, no entanto recomenda a utilização do fator de segurança 0,70.

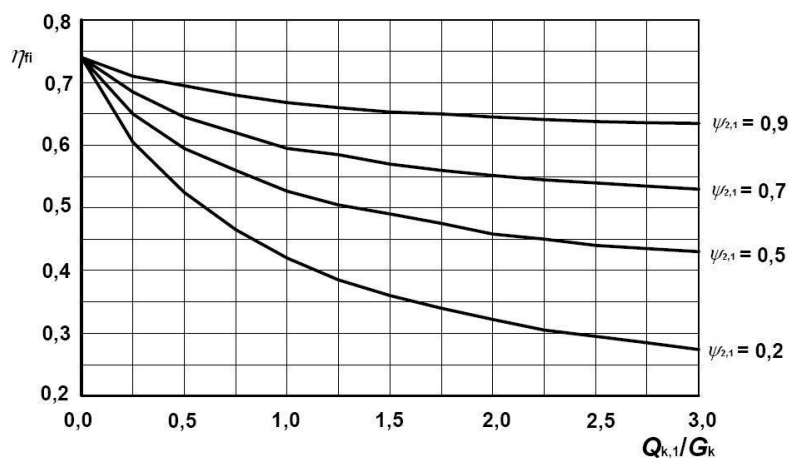


Figura 2.11: Valores do fator de redução [1]

## **2.4. MÉTODOS DE CÁLCULO**

Para avaliar o comportamento das estruturas sujeitas ao incêndio pode-se utilizar diferentes abordagens. Estas abordagens podem ser baseadas em juízos feitos por especialista com experiência acumulada consagrada, por ensaios laboratoriais e por meio de modelação. Podem ser feitas a elementos isolados, sem ter em conta a interação entre os mesmos, podem ser feitas por partes ou tendo em conta a estrutura no seu todo.

Das metodologias de análise existente para prever o comportamento das estruturas em situação de incêndio neste trabalho será apresentada quatro métodos abordados pelo EC2-1-2.

O Método Tabular, que consiste em valores Tabelados com disposições construtivas baseadas em ensaios experimentais em fornalhas ou em dados empíricos. É um método apenas utilizado em elementos isolados.

Os métodos simplificados, utilizados na análise das secções transversais, considerando o comportamento dos materiais em função de temperatura a que estão sujeita.

Métodos Avançados que baseiam no comportamento físico fundamental dos materiais, podendo ser feito a parte ou a estrutura completa. Esses métodos devem ser validados com bases em ensaios pertinentes.

O cálculo do esforço transversal, torção e amarração das armaduras, ao qual é pouco dada atenção no EC2-1-2 e que será estudada com mais pormenor nesse trabalho.

A utilização isolada de cada método pode não ser suficiente para obter a resposta ao comportamento das estruturas em situação de incêndio, daí que a combinação entre alguns deles possa ser uma mais-valia para a avaliação das estruturas [9]. Por exemplo no cálculo do esforço transversal e torção é utilizado pelo menos um dos métodos simplificados, ou então, como indicado no EC2-1-2, é utilizada informações de ensaios.

Em situação de incêndio os ensaios à escala real, ou a estruturas de elevada complexidade e tamanho, são limitadas por envolverem elevados custos, dessa forma é cada vez mais necessário o aperfeiçoamento dos métodos de cálculo, para obter o desempenho das estruturas em situação de incêndio [9].

### **2.4.1. MÉTODO TABULAR**

O Método Tubular é o método prescritivo mais tradicional, em que as características geométricas dos elementos estruturais mais usuais são apresentadas em Tabelas, em função do tempo requerido de resistência ao fogo. Este método é de aplicação restrita visto que, se por ventura a secção em análise possuir uma forma ou dimensão diferente da Tabelada, requer uma aproximação que pode ser obtida por meio de interpolação linear entre dados existentes, o que nem sempre fornece resultados realistas [4].

Os valores Tabelados mencionados no EC2-1-2, são valores elaborados numa base empírica confirmada pela experiência e pela avaliação dos resultados de ensaios, esses mesmos valores foram obtidos com base na Curva de Incêndio Padrão com um tempo de duração de 240 minutos, são aplicados para betão de massa volumica normal ( $2000\text{kg/m}^3$  a  $2600\text{kg/m}^3$ ) feitos com agregados siliciosos, caso não sejam feitos com esse tipo de agregado o EC2-1-2 indica que é necessário reduzir 10% da secção transversal. É considerado uma temperatura crítica para as armaduras de  $500^\circ\text{C}$  e um



fator de redução de carga de 0,70. No caso de temperatura ser diferente da crítica também é apresentado procedimentos que permitem determinar as dimensões mínimas de acordo com as apresentadas nas Tabelas.

A aplicação do Método Tabular dispensa a verificação relativa ao esforço transversal e à torção bem como ao efeito de destacamento do betão (*spalling*).

Das Tabelas propostas no EC2-1-2 para o Método Tubular, para satisfazer o requisito de compartimentação (apresentado na secção 2.3.2 do EC2-1-2) deve-se utilizar a Tabela 5.3, e para satisfazer os requisitos relativos a capacidade resistente pode ser utilizada as restantes Tabelas.

Para a avaliação da resistência ao fogo de pilares é apresentado no regulamento (EC2-1-2) dois métodos. O método A, para pilares sujeitos predominantemente aos esforços axiais e o método B para pilares sujeitos aos esforços axiais e momentos flectores.

Para as vigas os valores Tabelas são válidos para secções transversais representados na Figura 2.12, expostas ao fogo em três faces, sendo que a face superior encontra-se protegida pelo pavimento. No caso das quatro faces estarem expostas ao fogo também é aplicável os valores Tabelados, mas deve garantir que a altura viga não seja inferior a largura mínima requerida durante o tempo de exposição ao fogo e que a área da secção transversal da viga não ultrapasse  $2xb_{\min}^2$ .

Em casos em que existem apenas uma camada de armadura, a distância entre os eixos dos varões de canto da viga e o lado da mesma deve ser agravada de 10 mm no caso da viga estar exposta ao fogo nas três faces [1].

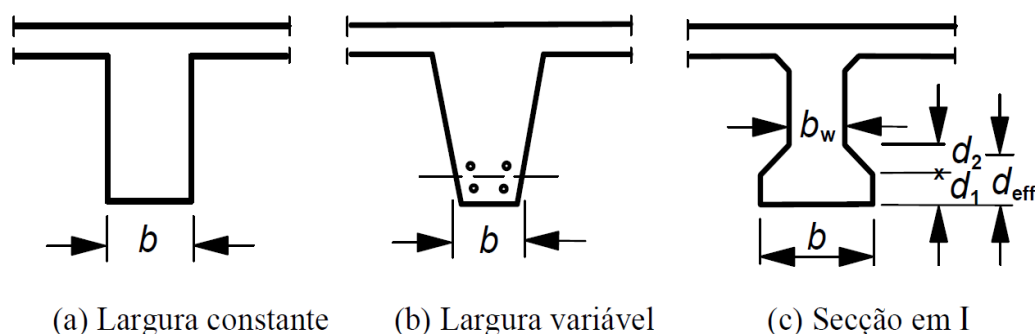


Figura 2.12: Dimensão para diferentes tipos de secção transversal.

#### 2.4.2. MÉTODOS SIMPLIFICADOS

O EC2-1-2 fornece métodos de cálculos simplificados baseados na redução da secção transversal e na alteração das propriedades dos materiais, de acordo com a temperatura a que as estruturas estiverem sujeitas.

Nos cinco anexos do EC2-1-2, são apresentadas metodologias simplificadas para a análise das estruturas em situação de incêndio. Nesse trabalho é abordado o anexo B e o anexo D.

No anexo B é fornecido dois métodos de cálculo simplificados, o Método da Isotérmica dos 500°C e o Método da Zonas, já no anexo D é fornecido métodos de cálculo para verificar a capacidade resistente ao esforço transversal, à torção e amarração das armaduras.

#### 2.4.2.1. Método da Isotérmica dos 500°C

O Método da Isotérmica dos 500°C é aplicado a secções de betão armado expostas ao Incêndio Padrão e a qualquer regime de incêndio que provoque campos de temperaturas semelhantes no elemento exposto. É um método válido para larguras mínimas, dependentes da resistência ao fogo pretendido. Estas larguras e os referidos tempos estão apresentados na Tabela a baixo:

Tabela 2.3: Largura mínima em função da resistência ao fogo

Resistência ao Fogo	R60	R90	R120	R180	R240
Largura mínima da secção (mm)	90	120	160	200	280

Este método de cálculo baseia-se a redução da secção transversal de acordo com uma zona danificada de espessura  $a_{500}$ , cuja profundidade é igual a Isotérmica de 500°C na zona de compressão da secção transversal. Esta zona danificada, como não contribui para a resistência do betão ela é excluída, sendo as dimensões da nova secção transversal determinadas usando a largura e a altura da secção transversal reduzida,  $b_{fi}$ , e  $d_{ef}$ , respetivamente. Os cantos arredondados da isotérmica podem ser considerados de forma retangular ou quadrangular, como apresentado na Figura 2.13 [1].

Nesse método de cálculo considera-se que nas zonas da secção onde as temperaturas são superiores a 500°C o betão não possui nenhuma resistência sendo por isso removidos a parte da secção correspondente, enquanto nas restantes, para efeitos de cálculo, é considerado as suas resistências à temperatura ambiente.

Para o aço deve ser considerado o efeito de temperatura através da redução das suas propriedades, Tabela 2.2, de acordo com a temperatura a que estiverem expostos.

Relativamente ao betão, este método considera que até aos 500°C as propriedades do betão não se alteram, o que não é tão realista, ou que a redução das propriedades do betão é pouco significativa.

Alguns autores apontam que o Método da Isotérmica dos 500°C é bastante conservativo, e sugerem a utilização de duas temperaturas, 400 e 600°C, para tornar o método mais eficaz.

A sugestão é desprezar zonas com temperaturas superiores a 600°C, para zonas com temperaturas entre 400 e os 600°C, considerar 70% das suas capacidades resistentes e para betão com temperaturas inferiores a 400°C considerar a sua capacidade total [10]

Os procedimentos de cálculos indicados no EC2-1-2, na aplicação do Método da Isotérmica são:

- 1) Determinação da Isotérmica dos 500°C para o tempo de exposição ao fogo especificado, ao fogo padrão ou paramétrico, de acordo com os perfis de temperatura da secção transversal;
- 2) Cálculo das novas características da secção transversal, após ter conhecido a temperatura nas mesmas e as zonas danificadas, como apresentado na Figura 2.13.
- 3) Determinação de temperatura no centro dos varões de armaduras existente na secção. Mesmo que um varão fique fora da secção transversal reduzida ela deve ser considerada no cálculo da capacidade resistente última da secção transversal.
- 4) Cálculo do fator de redução do aço, de acordo com a temperatura a que ela estiver sujeita.
- 5) Usar os métodos de cálculo convencionais para a secção transversal reduzida calculada e aplicar o fator de redução do aço para calcular a capacidade resistente última da secção.

- 6) Fazer a verificação de segurança, comparando a capacidade resistente com os efeitos das ações atuantes ( $E_{d,fi} \leq R_{d,fi}$ ).

No caso das armaduras estiverem dispostas em camadas e tiverem as mesmas áreas (em alguns casos de lajes e ou vigas por exemplo), o fator de redução médio é dada pela seguinte Expressão:

$$k_v(\theta) = \frac{\sum k_s(\theta_i)}{n_v} \quad (2.23)$$

Sendo  $k_s(\theta_i)$  o coeficiente de redução do varão  $i$ ,  $k_v(\theta)$  o coeficiente de redução médio da camada  $v$  e  $n_v$  o número de varões na camada  $v$ .

Caso os varões sejam de dimensões diferentes deverá ser efetuada uma média ponderada do coeficiente de redução do aço em função da área de cada varão

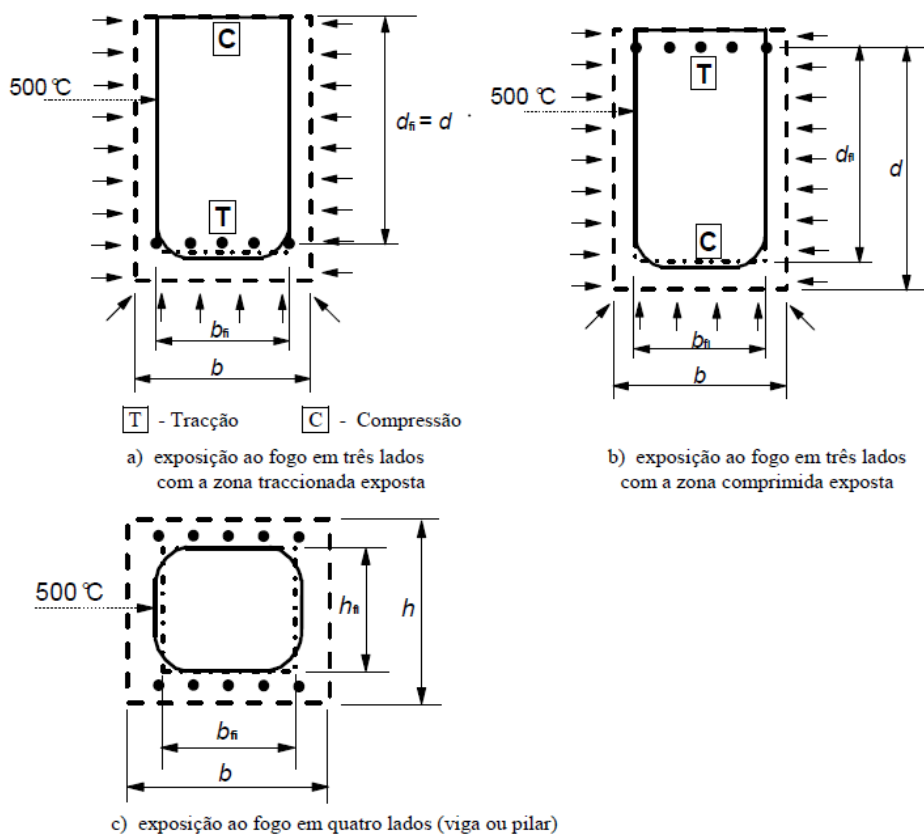


Figura 2.13: Secção transversal reduzida de uma viga ou um pilar

#### 2.4.2.2. Método das Zonas

Este método consiste na divisão da secção transversal em várias zonas e é aplicável a secção transversal sujeitas qualquer Curva de Incêndio totalmente desenvolvida, embora no EC2-1-2 seja fornecido dados unicamente para Curvas de Incêndio Padrão. É mais rigoroso que o Método da Isotérmica dos 500°C fornecendo por isso resultados mais precisos, principalmente para pilares.

Para a aplicação do método deve dividir a secção transversal em pelo menos três zonas retangulares paralelas de igual espessura, para cada uma das quais é calculada a temperatura média e a respetiva resistência do betão à compressão,  $f_{cd}(\theta)$ , e o módulo de elasticidade, caso se aplique.

Nesse método também é calculado a secção transversal reduzida, que resulta da eliminação da zona danificada de espessura  $a_z$  nas faces expostas ao fogo (Figura 2.14). Para parte inferior e para extremidades de elementos retangulares expostos ao fogo, em que a largura é inferior à altura, o valor de  $a_z$  terá que ser igual ao calculado para os lados [1].

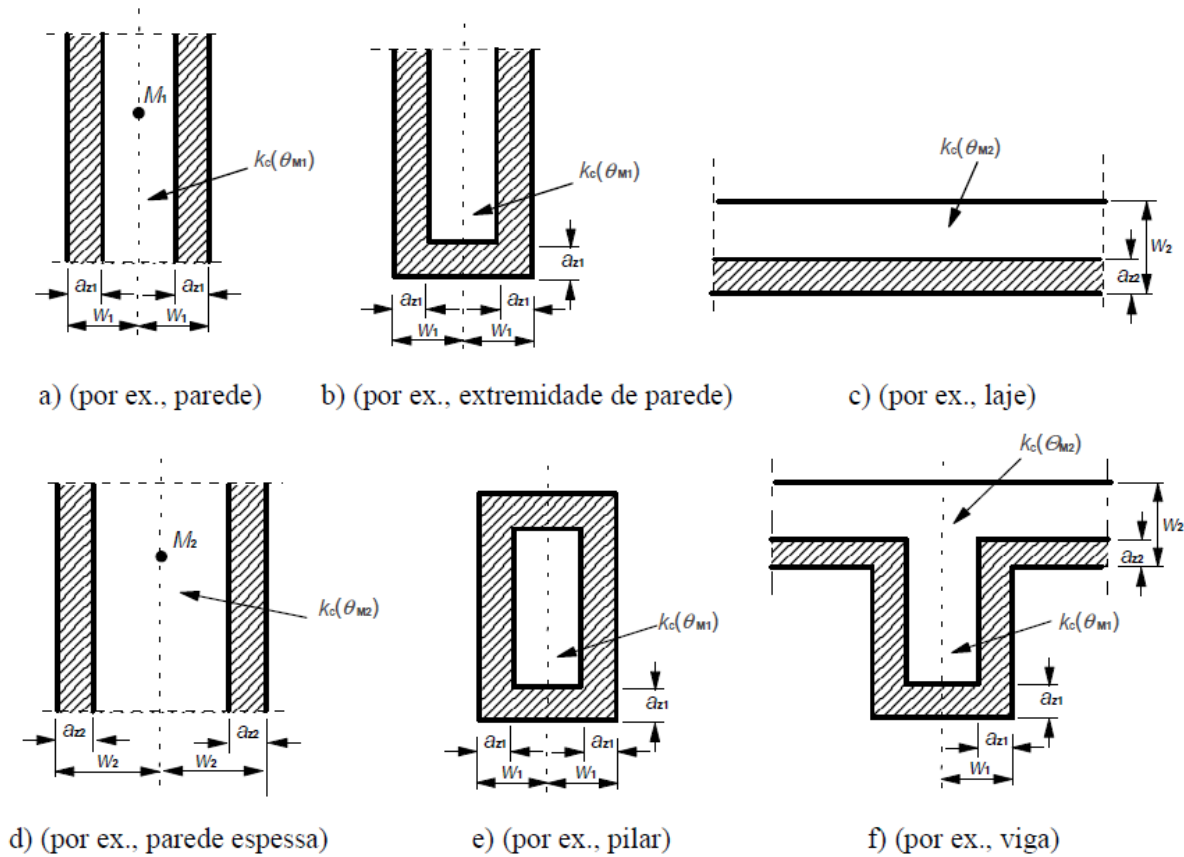


Figura 2.14: Redução da secção transversal para o Método das Zonas

Numa secção retangular exposta ao fogo apenas numa face a largura é assumida como  $w$ , e quando a secção estiver sujeita ao fogo nas duas faces opostas a largura é de  $2w$ .

A espessura  $a_z$  é calculada de acordo com os seguintes procedimentos [1]:

- Divisão da secção transversal em  $n$  zonas iguais, com o mínimo de três e o cálculo da espessura  $w$ ;
- Calcular a temperatura no centro de cada zona e determinar os respetivos fatores de redução à compressão do betão,  $k_c(\theta_i)$ , nestas zonas;
- Calcular o fator de redução a médio do betão (ponto representado na Figura 2.15), usando a Expressão 2.24, a fim de ter em conta a temperatura em cada uma das zonas consideradas.

$$k_{c,m} = \frac{\left(1 - \frac{0,2}{n}\right)}{n} \times \sum_{i=1}^n k_c(\theta_i) \quad (2.24)$$

Em que  $n$  é o número de zonas paralelas na largura  $w$ ,  $m$  número de zonas e  $w$  metade da largura

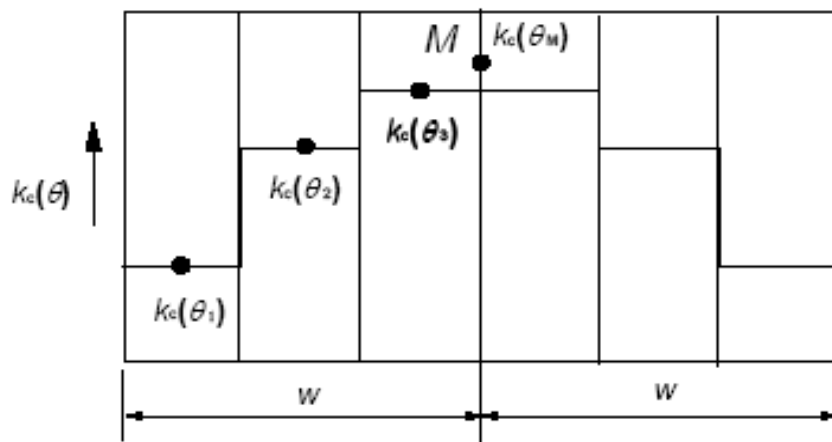


Figura 2.15: Divisão das zonas e localização do ponto M [1]

- E por fim, calcular a largura da zona danificada  $a_z$ , usando a Expressão 2.25 para lajes vigas e elementos em flexão simples e a Expressão 2.26 para pilares, paredes e outras construções onde possam ocorrer os efeitos de segunda ordem.

$$a_z = w \times \left[ 1 - \frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)} \right] \quad (2.25)$$

$$a_z = w \times \left[ 1 - \left( \frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)} \right)^{1,3} \right] \quad (2.26)$$

Tendo a espessura da zona danificada os procedimentos para o cálculo com o Método das Zonas são os seguintes:

- 1) Obter as características da secção transversal reduzida, após determinar a largura da zona danificada  $a_z$ ;
- 2) Calcular as temperaturas nos centros dos varões da secção transversal e os respetivos coeficientes de redução;
- 3) Usar os métodos de cálculo convencionais para a secção transversal reduzida calculada e aplicar o fator de redução do aço ( $k_s$ ), e do betão  $k_c(\theta_M)$  calculada no ponto  $M$ , para obter a capacidade resistente última da secção.

O fator de redução médio  $k_c(\theta_m)$  também pode ser obtido de acordo com o gráfico da Figura 2.16, apresentado no EC2-1-2, e em função do tempo de resistência ao fogo e da espessura  $w$  do elemento.

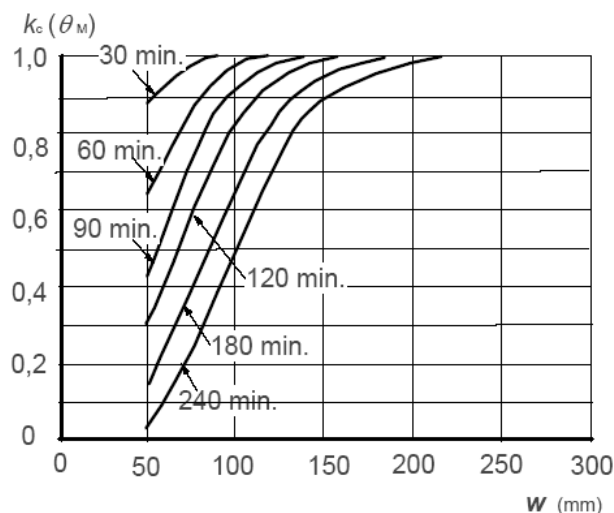


Figura 2.16: Cálculo do fator de redução por via gráfica [1]

- 4) Fazer a verificação de segurança, comparando a capacidade resistente com os efeitos das ações atuantes ( $E_{d,fi} \leq R_{d,fi}$ ).

#### 2.4.2.3. Método de cálculo para verificação da resistência ao esforço transversal e à torção

A verificação de segurança ao esforço transversal e à torção em estruturas de betão armado em situação de incêndio ainda encontra-se pouco especificada. No entanto o EC2-1-2, mesmo reconhecendo que são raras as roturas provocadas pelo esforço transversal e pela torsão em elementos de betão armado em situação de incêndio, indica, no seu anexo D, métodos de cálculo para considerar esses efeitos, embora admita que esses métodos não estejam totalmente verificados.

Segundo o EC2-1-2, em situação de incêndio a capacidade resistente ao esforço transversal e à torção podem ser calculados de acordo com o Eurocódigo 2 parte 1-1 (EC2-1-1), utilizando valores reduzidos das propriedades dos materiais.

Podem ser utilizados os mesmos métodos de cálculo propostos na secção 4.2 do EC2-1-2, e aqui apresentadas no subCapítulo anterior, aplicando diretamente à secção transversal reduzida disposta no EC2-1-1.

Se a capacidade resistente da secção depender principalmente da tensão de rotura do betão à tração, deve-se considerar o comportamento real do betão ao esforço transversal a altas temperaturas, aplicando o fator de redução do betão à tração apresentadas no EC2-1-2 e deve também considerar o aumento das tensões de tração, que provocam a redução da resistência ao esforço transversal [1].

##### 1. Método de Cálculo ao Esforço Transverso

Como foi dito anteriormente, os métodos de cálculo ao esforço transversal são auxiliados pelos métodos simplificados, nomeadamente, ou o Método da Isotérmica dos 500°C ou o Método das Zonas, de acordo com o escolhido.

Os procedimentos de cálculo para a verificação da resistência ao esforço transversal numa secção de betão armado são os seguintes:

- a) Cálculo da geometria da secção transversal reduzida, de acordo com o Método da Isotérmica dos 500°C (ISO 500°C) ou com o Método das Zonas (M.Z.);

- b) Cálculo da resistência à compressão do betão  $f_{cd,fi}$  e/ou à tração  $f_{ct,fi}$ , de acordo com o caso a que se aplicam. Essa resistência é calculada de acordo com o método simplificado escolhido. Se for escolhido a ISO 500°C a resistência à compressão do betão é dada por,  $f_{cd,fi}=f_{cd}$ , no interior da Isotérmica dos 500°C e para o Método das Zonas é dada por,  $f_{cd,fi}=k_c(\theta_M) \times f_{cd}$ .
- c) Determinar a área de betão tracionado, conforme a Figura 2.17;
- d) Calcular a temperatura de referência  $\theta_P$ , dos estribos e a temperatura no ponto P, também representada na Figura 2.17;
- e) Calcular o fator de redução do aço nos estribos  $k_s(\theta)$  e fazer a redução da resistência do aço de estribo dado por:  $f_{sd,fi}=k_s(\theta) \times f_{sd}$ ;
- f) Aplicar os métodos de cálculos presentes no EC2-1-1, para a verificação de segurança ao esforço transversal, utilizando as resistências reduzidas para o aço e para o betão de acordo com a temperatura a que estiverem sujeitas.

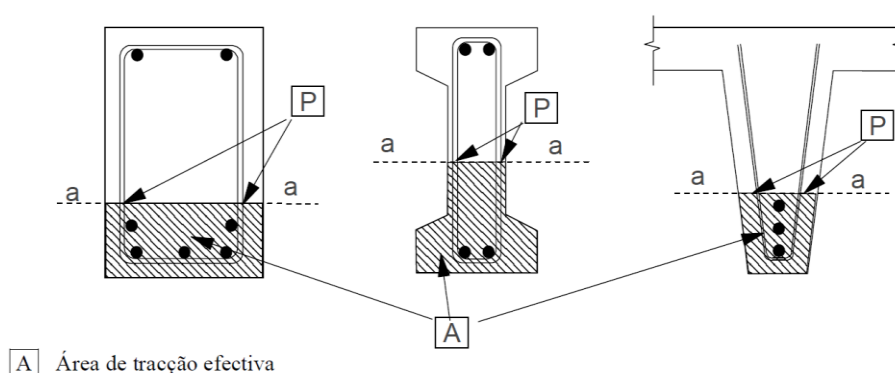


Figura 2.17: Ponto para o cálculo de temperatura de referência dos estribos no esforço transversal [1].

## 2. Método de cálculo à torção

Tal como foi referido para o esforço transversal a rotura por torção de elementos estruturais de betão armado em situação de incêndio é difícil de se verificar, sendo também dada pouca atenção no EC2-1-2.

Relativamente aos métodos de cálculo os procedimentos indicados para o esforço transversal, da alínea a) até c), também são válidos para a torção, ao qual é acrescentado os seguintes passos:

- a) Para o cálculo do fator de redução do aço nos estribos  $k_s(\theta)$ , a temperatura é determinada no ponto P indicada na Figura 2.18, a seguir apresentada, e a redução da resistência do aço é feita, tal como no esforço transversal, da usando a Expressão:  $f_{sd,fi}=k_s(\theta) \times f_{sd}$ ;
- b) Para a torção também continua a ser válido os métodos de cálculo apresentados no EC2-1-1, sendo que a verificação em situação de incêndio é feita aplicando os fatores de redução ao aço e betão de acordo com a temperatura a que estiverem sujeitas.

Tanto o cálculo para o esforço transversal como o cálculo para a torção secções de betão armado em situação de incêndio estão pouco explicitados no EC2-1-2, no Capítulo 3 desse trabalho será abordado com mais pormenor esse assunto.

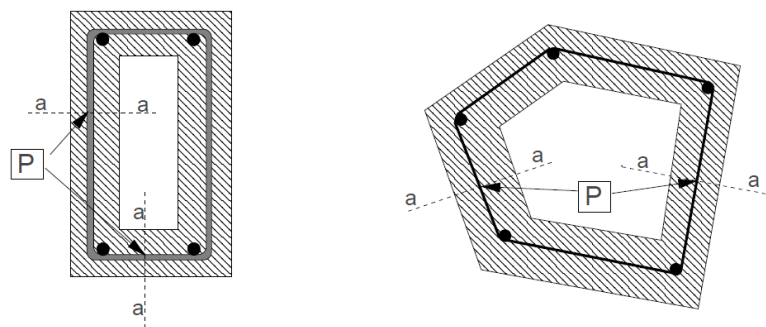


Figura 2.18: Ponto para o cálculo de temperatura de referência dos estribos para a torção.

### 2.4.3. MÉTODOS AVANÇADOS

A análise do comportamento de estruturas de betão armado em situação de incêndio mediante a realização de ensaios laboratoriais é, como já foi mencionado, de difícil execução.

Os métodos de cálculo simplificados, apesar de serem de maior facilidade de utilização, por vezes podem não traduzir o real comportamento de estruturas, principalmente quando os efeitos indiretos resultantes da ação do fogo nas estruturas são significativos.

Os métodos de cálculo avançados Figuram como uma excelente alternativa aos métodos simplificados e às análises por via de resultados laboratoriais na verificação da segurança dos estruturas em situação de incêndio

As grandes e principais vantagens dos métodos avançados relativamente aos métodos laboratoriais são [9]:

- O menor custo associado aos métodos numéricos, visto que a realização de ensaios para estruturas em situação de incêndio possui um elevado custo e requer um tempo considerável de preparação;
- A possibilidade de avaliar o comportamento das estruturas completa incluindo o fenómeno de redistribuição de carga complexo;
- A possibilidade de fazer estudos paramétricos com maior garantia de manutenção dos restantes parâmetros.

Os métodos de cálculo avançado podem também servir para a confirmação dos resultados de cálculos feitos pelos métodos simplificados. Dado a sua grande importância, esses métodos terão que ser bem calibrados e antes da sua utilização necessitam de testes experimentais que confirmam os resultados, para que os estes resultados sejam mais confiáveis [11].

O desenvolvimento de softwares para a análise de estruturas em situação de incêndio tem sofrido grandes evoluções, desde programas específicos para determinados elementos estruturais ou secções transversais, passando por programas para o uso geral, que apesar de outros usos também possibilitam a análise de estruturas em situação de incêndio, até programas desenvolvidos especificamente para análise de estruturas em situação de incêndio [11].



Dos programas específicos para a análise de estruturas em situação de incêndio, destaca-se o SAFIR, utilizado neste trabalho e em outros trabalhos, como em [12] e [13], que permite fazer tanto a análise térmica separada, que podem ser usada por exemplo nos métodos simplificados (usados em [12] e [13]), bem como a análise mecânica, após ter sido feito a análise térmica.

A seguir é apresentado o programa de cálculo avançado SAFIR, utilizado neste trabalho.

#### 2.4.2.3.SAFIR

O programa SAFIR foi desenvolvido na Universidade de Liège, Bélgica, por Jean-Marc Franssen, é um programa de elementos finitos que pode ser utilizada para análise de estruturas em situação de incêndio ou de estruturas à temperatura ambiente. Permite também uma análise das estruturas numa, duas ou três dimensões [14].

Os procedimentos de cálculo utilizados no programa são: A análise térmica, onde é obtido a distribuição de temperatura no interior do elemento, uma análise torsional, para estruturas tridimensionais sujeitas ao empenamento ou quando não se conhece a rigidez de torção e por fim o cálculo estrutural, considerando as ações térmicas e estáticas [14].

A análise térmica feita pelo SAFIR permite a obtenção de temperatura no interior da secção de acordo com o tempo de exposição ao fogo especificado para a análise. É utilizado elementos finitos triangulares e quadrangulares, os quais é possível definir de que tipos de material são constituídos cada um desses elementos.

Alguns materiais, como aço e o betão, dispostos nos Eurocódigos, podem ser indicados ao programa, sendo que o mesmo consegue obter as suas características e considerar as variações das suas propriedades térmicas. O programa já dispõe de códigos para as possíveis Curvas de Incêndio, sendo que é necessário definir o tipo de curva que se pretende utilizar para fazer a análise térmica [14].

O resultado da análise térmica pode ser visualizado no pós-processador Diamond e os dados editados para os ficheiros ASCII

Nesse trabalho a análise térmica é feita para secções transversais, utilizando elementos finitos 2D-solidos e a Curva de Incêndio Padrão, sendo que os materiais são os utilizados nos Eurocódigos 2, 3 e 4.

O programa SAFIR possui algumas capacidades assim como também apresenta limitações. Alguma dessas capacidades e limitações é apresentada por Gonçalves [9] os quais pode-se indicar:

- As análises podem ser feitas a secções planas e a estruturas tridimensionais. Sendo que há uma facilidade em representar qualquer forma das secções por serem discretas por elementos retangulares e/ ou triangulares;
- A possibilidade de considerar um material para cada elemento é muito vantajosa visto que pode-se analisar secções com diferentes materiais;
- A temperatura é definida em função do tempo, pode traduzir as diferentes Curvas de Incêndio. Há também a possibilidade de considerar curvas com fases de arrefecimento;
- A variação das propriedades térmicas provocadas pela variação de temperatura é tida em conta;

- Não é considerada os movimentos de vapor de água;
- A influência da distribuição das tensões não é considerada;
- Em temperatura muito elevada é de difícil conhecimento das propriedades térmicas dos materiais isolantes

No que se refere a análise de estruturas a altas temperaturas as principais capacidades do programa prendem-se sobretudo com a possibilidade de considerar os grandes deslocamentos em elementos de barra, casca e viga, a consideração das extensões térmicas sendo que as propriedades dos materiais são não lineares e dependentes de temperatura [9].

As inconveniências prendem-se sobretudo com a incapacidade de prever o efeito *spalling*. A incapacidade para detetar a roturas por encurvadura local, por escorregamento entre as armaduras e o betão. A incapacidade de detetar roturas por esforço transversal ainda continua a ser um desafio que este programa tem por ultrapassar. Também é necessário ter em atenção a grande ductilidade que o software tende a considerar, podendo dessa forma ser necessário considerar o estado limite último, que pode ou não ser aceitável em termos de deformação [9].

A metodologia de cálculo do SAFIR é baseada no elemento finito de Bernoulli e é considerada as seguintes hipóteses [9]:

- É válida a hipótese de Bernoulli;
- As plastificações são apenas consideradas na direção longitudinal do elemento por meio de elementos constitutivos uniaxiais;
- É possível considerar a torção não uniforme em elementos tridimensionais.

Para a análise térmica admite-se a hipótese do material ser isotrópico, não submetida a movimentos, não compressíveis e que não há dissipação mecânica. Assim sendo é aplicável a Equação de Fourier para descrever a transferência de calor por condução em sistemas de coordenadas cartesianas, x, y e z (Expressão 2.27) [14].

$$c\rho \times \frac{\partial \theta}{\partial t} = k \times \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) + Q \quad (2.27)$$

Em que  $k$  é a condutividade térmica em  $w/mK$ ,  $\theta$  é a temperatura em  $K$ ,  $Q$  o calor interno em  $w/m^3$ ,  $\rho$  a massa específica em  $kg/m^3$  e  $t$  o tempo em segundos. Nessa Equação é possível confirmar que no programa é tido em conta as principais propriedades térmicas.

Ao resolver a Equação 2.27, por meio do método dos elementos finitos e aplicando as funções de forma, Franssen [11] indica a Equação final apresentado a baixo:

$$[K]\{T\} + [C]\{T\} = \{g\} \quad (2.28)$$

Onde  $K$  é a matriz da condutividade térmica,  $C$  a matriz da capacidade,  $T$  o vetor temperatura e  $g$  o vetor das trocas de calor no limite.

### **3.**

## **COMPORTAMENTO AO CORTE DE ELEMENTOS DE BETÃO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

### **3.1. INTRODUÇÃO**

A verificação de segurança ao corte de elementos de betão armado em situação de incêndio é pouco especificado tanto nos códigos normativos, como os Eurocódigos, como nos programas de cálculo avançado, como o SAFIR.

Este facto pode ser confirmado no EC2-1-2 que, mesmo sendo específico para estruturas em situação de incêndio, não apresenta metodologias específicas para a verificação de segurança ao corte. Nas metodologias gerais apresentadas é assumido que não estão totalmente verificados.

No que se refere aos programas de cálculo avançado, como indicado em [12] e [15], a utilização de modelos termomecânicos baseados no programa SAFIR não permitem fazer uma avaliação das roturas por corte.

As roturas por corte nas estruturas em situação de incêndio são avaliadas com base nas metodologias utilizadas para a avaliação à temperatura ambiente presente no EC2-1-1 afetando-as o efeito de temperatura, tanto para as características da secção como para as propriedades dos materiais. Para a mesma avaliação pode ser utilizado tanto o Método da Isotérmica dos 500°C como o Método das Zonas.

Para a avaliação das roturas por esforço transversal em situação de incêndio, quando se utiliza o Método da Isotérmica dos 500°C ou o Método das Zonas, proposto no EC2-1-2, existem algumas questões menos claras a nível da geometria da secção reduzida, nomeadamente no cálculo da espessura eficaz efetiva da parede ou da secção.

Quando se pretende fazer uma avaliação a nível da torção nas secções de betão armado em situação de incêndio as principais questões que se possam surgir têm a ver com, além do cálculo da espessura eficaz, a temperatura a considerar no caso de uma zona estar na parte oca ou entre a alma da secção oca e a parte oca.

### 3.2. ESFORÇO TRANSVERSO

A verificação de rotura por esforço transverso em elementos de betão armado em situação de incêndio ainda está para ser explorada, não obstante alguns estudos já feitos por [15]. Mesmo os regulamentos específicos para a verificação de segurança de elementos betão armado em situação de incêndio, como exemplo desses códigos normativos é o Eurocódigo 2, possuem algumas lacunas por preencher nessa matéria.

No EC2-1-2 [1] a verificação de segurança ao esforço transverso é tratada no anexo D, onde posteriormente nos remete para o Eurocódigo 2 parte 1 [16].

De acordo com o EC2-1-2, a verificação de segurança ao esforço transverso de elementos de betão armado em situação de incêndio deve ser feita de acordo com o EC2-1-1, utilizando as propriedades reduzidas dos materiais e a redução da secção transversal, de acordo com o método escolhido, exposto no Capítulo anterior.

#### 3.2.1. CÁLCULO DO ESFORÇO TRANSVERSO EM SECÇÕES À TEMPERATURA AMBIENTE

Para estruturas onde seja necessário armaduras de esforço transverso, a resistência ao esforço transverso é determinada com base no modelo da treliça de Morsch apresentada na Figura 3.1.

O valor do esforço transverso é limitado pela capacidade de cedência dos estribos. Para secções com estribos verticais esta capacidade é calculada de acordo com Expressão 3.1, sendo o valor máximo dada pela capacidade resistente ao esmagamento do betão, apresentada na Expressão 3.2.

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{S} \times z \times f_{ywd} \times \cot \theta \quad (3.1)$$

Onde  $V_{Rd,s}$  o esforço transverso resistente,  $A_{sw}$  área da secção transversal das armaduras de esforço transverso,  $S$  o espaçamento dos estribos,  $f_{ywd}$  o valor de cálculo da tensão de cedência das armaduras de esforço transverso,  $z$  é o braço do binário das forças interiores, para elementos de altura constante, correspondente ao momento fletor no elemento considerado e  $\theta$  o angulo formado pela escora comprimida de betão com o eixo da peça.

O EC2-1-1 [16] especifica que na verificação ao esforço transverso numa secção de betão armado onde não há esforço normal, valor do  $z$  pode ser 90% da altura útil da secção ( $z = 0,9d$ )

O angulo  $\theta$  deve estar compreendido entre os seguintes valores:  $1 \leq \cot \theta \leq 2,5$ .

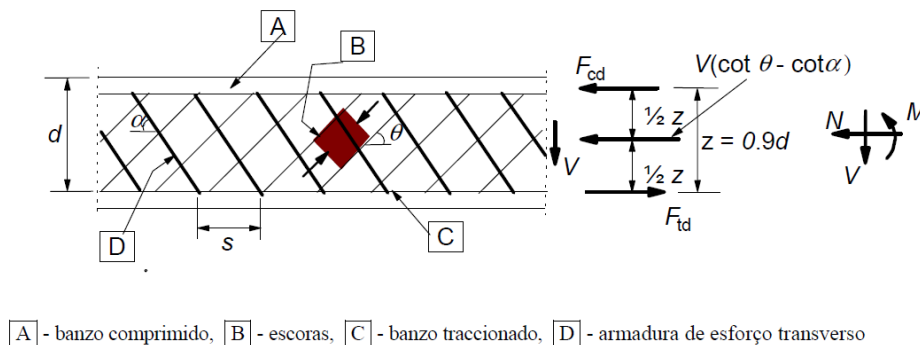


Figura 3.1: Modelo da treliça de Morsch para o cálculo do esforço transverso [16]

O valor do esforço transversal máximo resistente,  $V_{Rd,max}$ , que garante o não esmagamento do betão, para estribos normais ao eixo da peça, é dado pela Expressão a baixo.

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \times b_w \times z \times \nu_1 \times f_{cd}}{(\cot \theta + \tan \theta)} \quad (3.2)$$

Em que  $V_{Rd,max}$  esforço transversal máximo,  $b_w$  é a largura mínima da secção transversal de betão,  $z$  tem o mesmo significado que na Expressão anterior (3.1)  $f_{cd}$  o valor de cálculo da resistência à compressão do betão,  $\nu_1$  é o valor de redução da resistência do betão fendilhado por esforço transversal, calculado pela Expressão 3.3 e  $\alpha_{cw}$  coeficiente para levar em conta o estado de tensão no banzo comprimido, calculado pela Expressão 3.4.

$$\nu_1 = 0,6 \times \left( 1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) \quad (3.3)$$

Com  $f_{ck}$ , o valor característico da resistência de betão à compressão.

$$\begin{aligned} \alpha_{cw} &= 1,0 & \text{se } \sigma_{cp} &= 0,0 \\ \alpha_{cw} &= 1,0 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} & \text{se } 0 \leq \sigma_{cp} \leq 0,25 f_{cd} \\ \alpha_{cw} &= 1,25 & \text{se } 0,25 \leq \sigma_{cp} \leq 0,5 f_{cd} \\ \alpha_{cw} &= 2,5 \left( 1,0 - \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} \right) & \text{se } 0,5 f_{cd} \leq \sigma_{cp} \leq 1,0 f_{cd} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Com  $\sigma_{cp}$  a tensão de compressão média no betão devido ao valor de cálculo do esforço normal.

No caso das armaduras de esforço transversal não serem verticais os valores do esforço transversal resistente e do esforço transversal máximo que garante o não esmagamento do betão são dados pelas Expressões 3.5 e 3.6 respetivamente.

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{S} \times z \times f_{ywd} \times (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha \quad (3.5)$$

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \times b_w \times z \times \nu_1 \times f_{cd} \times (\cot \theta + \cot \alpha)}{(1 + \cot^2 \theta)} \quad (3.6)$$

Tendo os parâmetros os mesmos significados que nas Expressões 3.4 e 3.5 e  $\alpha$  o ângulo formado pela armadura de esforço transversal e o eixo da peça.

Como foi dito anteriormente, a avaliação da resistência ao esforço transversal para estruturas de betão armado em situação de incêndio é feita de acordo com os métodos apresentados no EC2-1-1, aqui apresentados pelas Expressões 3.1 a 3.6. Mas para que seja utilizado essas Expressões, deve-se prosseguir, como indicado em [1], com a redução da resistência do aço dos estribos e do cálculo da

geometria reduzida, de acordo com a temperatura instalada na peça, e com a redução da resistência à compressão do betão caso seja utilizado como método auxiliar de cálculo o Método das Zonas.

### 3.2.2. CÁLCULO DO ESFORÇO TRANSVERSO EM SECÇÕES EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

#### 3.2.2.1. Pelo Método da Isotérmica dos 500°C

O primeiro passo para calcular o esforço transversal resistente numa secção de betão armado em situação de incêndio consiste em calcular a secção transversal reduzida, de acordo com os procedimentos apresentados no Capítulo 2 desse trabalho, após ser realizado a análise térmica para a obtenção das temperaturas.

O passo seguinte é a determinação do fator de redução do aço do estribo. Esse fator é obtido de acordo com a Tabela 2.2 com base na temperatura dos estribos.

A avaliação de temperatura nos estribos não é de fácil determinação, como indicado em [1], sabendo que os estribos atravessam diferentes zonas com diferentes temperaturas e sabendo também que o estribo é um bom condutor de calor, este tende a distribuir o calor das zonas mais quentes para as mais frias, por isso a temperatura do estribo é inferior a do betão envolvente e tende a uniformizar-se em todo o seu comprimento [1].

Dado a essas particularidades o EC2-1-2, indica o ponto ao qual se deve determinar a temperatura dos estribos (ponto *P* Figura 3.2) que é dado pela Expressão 3.7. Na Figura 3.2 pode-se constatar que o ponto *P* localiza na intersecção dos estribos com a linha a-a, que é o limite superior da Área efetiva de tração e situa a uma altura  $h_{c,ef}$  da base.

$$h_{c,ef} = \min \left\{ 2,5 \times (h - d); \frac{(h - x)}{3}; \frac{h}{2} \right\} \quad (3.7)$$

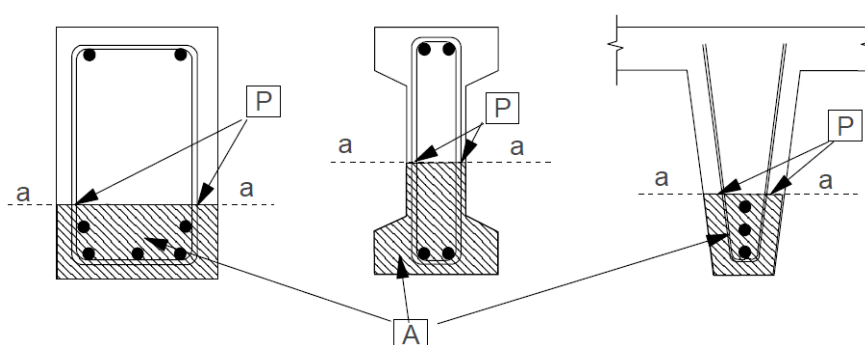
Com  $h$ ,  $d$  e  $x$  definidos de acordo com a Figura 3.2

Estando calculada a temperatura no ponto referencia, pode-se aplicar a redução da resistência do aço do estribo mediante o cálculo do fator de redução, de acordo com a Tabela 2.2.

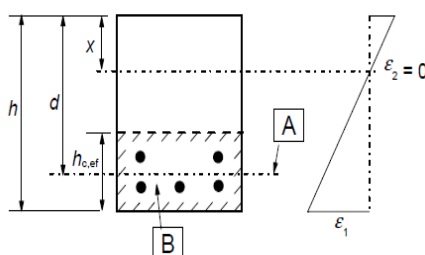
A resistência à compressão do betão não é alterada para esse método, como explicado no Capítulo anterior (Capítulo 2).

Após os dois passos a cima indicados o último passo consiste em determinar o ângulo ótimo  $\theta$ , obtido igualando as Expressões 3.1 e 3.2, para estribos verticais e a igualando as Expressões 3.5 e 3.6, para estribos inclinados e determinar o esforço transversal resistente em situação de incêndio.

É de realçar que para cada incremento de tempo os parâmetros utilizados no cálculo dos esforços transversos vão se alterando. Esses parâmetros são: A nível das características da secção regista-se uma diminuição de  $b_w$ ,  $d$  e  $z$  que influenciarão os parâmetros  $h_{c,ef}$  e consequentemente  $f_{ywd}$ , o ângulo  $\theta$  e os valores de  $V_{rd}$  e  $V_{rd,max}$ .



a) Localização do ponto P para a temperatura de referência [1]



b) Área efetiva de armadura de tração [16]

Figura 3.2: Cálculo de temperatura de referência

### 3.2.2.1. Pelo Método das Zonas

Tal como no Método da Isotérmica dos 500°C, o primeiro passo para a análise de uma estrutura de betão armado em situação de incêndio, consiste no cálculo da secção transversal reduzida pelo Método das Zonas, tal como o exposto no anexo B do EC2-1-2, apresentado no Capítulo 2 do trabalho.

Após determinar as características da secção reduzida prossegue-se à determinação do fator de redução do aço de estribo, aplicando o fator de redução de acordo com a temperatura a que se encontra exposta. Essa avaliação é igual à feita para a Isotérmica dos 500°C, isto é, é calculada a temperatura de referência a uma altura  $h_{c,ef}$  e com base nessa temperatura determina-se o fator de redução do aço de acordo com a Tabela 2.2.

Nesse método a resistência à compressão do betão já não se mantém igual à temperatura ambiente, ela é reduzida de acordo com a temperatura do ponto  $M$ , apresentado na Figura 2.15.

Para finalizar o cálculo prossegue os mesmos procedimentos que no Método da Isotérmica dos 500°C, sendo válidos os mesmos pressupostos, nomeadamente as alterações dos esforços resistentes causados pela redução das características da secção transversal, da redução da resistência dos estribos, e da redução da resistência à compressão do betão.

### 3.3. TORÇÃO

A verificação de segurança ao corte, esforço transversal e torção, de elementos de betão armado em situação de incêndio, além de ser de difícil ocorrência, ainda encontra-se pouco estudado. Se no esforço transversal existem alguns estudos, relativamente à torção estes estudos ainda são menores.

Para a verificação de segurança à torção de secções de betão armado em situação de incêndio, o EC2-1-2 [1], no seu anexo D indica que ela pode ser calculada, de forma análoga ao esforço transversal, utilizando os pressupostos do EC2-1-1, após a redução das propriedades dos materiais de acordo com a análise térmica feita previamente.

A verificação da segurança à torsão em situação de incêndio pode ser feita tanto pelo Método da Isotérmica dos 500°C como pelo Método das Zonas

Neste trabalho, far-se-á, numa primeira fase, uma abordagem das formas de cálculo da torção para secções à temperatura ambiente para depois fazer o seu enquadramento quando essas mesmas secções estiverem sujeitas a altas temperaturas.

#### 3.3.1. CÁLCULO DA TORÇÃO EM SECÇÕES À TEMPERATURA AMBIENTE

O EC2-1-1 trata a torção de equilíbrio indicando que o mesmo deve ser verificado quer em relação aos estados limites últimos como em relação aos estados limites de utilização.

Em secções onde a torção é de compatibilidade provocada por virtude da continuidade de rotações entre diferentes elementos fletidos [17], e não existe torção de equilíbrio, não é necessário verificar a torção em relação aos estados limites últimos, podendo adaptar nesses casos armaduras mínimas para as secções em análise [16].

Os esforços de torção numa secção são frequentemente acompanhados de empenamento da mesma, o que para secções maciças e secções fechadas de paredes finas é de pouca relevância, esse tipo de torção é designada de torção circular ou de St. Venant.

As secções abertas do tipo U ou H podem estar sob efeito de torção com empenamento que é quando há um impedimento do efeito de empenamento provocando um acréscimo considerável de tensões nos elementos [17].

O cálculo da torção abordada no EC2-1-1 é do tipo de torção circular ou de St. Venant. No mesmo código é referido que o cálculo a esse tipo de torção pode ser feito com base numa secção fechada de paredes finas, onde o equilíbrio é satisfeito pelo fluxo fechado de tensões tangenciais.

Quando a secção for cheia ela pode ser transformada numa secção oca equivalentes às paredes finas. Para o caso de secções complexas, tipo T por exemplo, elas podem ser divididas em secções elementares para cada uma das quais é idealizada uma secção de parede fina equivalente, onde a resistência final à torção é a soma da resistência de cada uma dessas secções elementares [16].

Ao transformar a secção cheia numa secção oca, assume-se os seguintes pressupostos [18]:

- Há uma distribuição uniforme tensões tangenciais  $\tau$ , em toda a espessura das paredes;
- O fluxo das tensões tangenciais é constante, isto é:  $\tau_1 \times t_1 = \tau_2 \times t_2$ , com  $t$ , espessura da parede. Quando a secção for oca essa espessura não deve ultrapassar a espessura real;
- O esforço de corte é calculado usando a Expressão seguinte:  $V_i = \tau_1 \times t_1 \times z_i$  com  $z_i$  comprimento médio da parede definido ao longo da linha média;



- O equilíbrio de momentos origina em:  $\tau_1 \times t_i = \frac{T}{2 \times A_k}$ , onde  $A_k$  é a área definida pelo perímetro da secção oca;
- De acordo com os pressupostos anteriores resulta que o esforço de corte  $V_i$  é dado por:  

$$V_i = \frac{T}{2 \times A_k} \times z_i.$$

Tal como é mencionado em [18] o modelo de cálculo da torção baseia-se na definição duma secção oca equivalente de paredes finas, em que a zona central do betão é desprezada.

Dado à disposição das fendas resultantes do esforço de torção e para assegurar a capacidade resistente da secção, as disposições das armaduras de torção terão de interceptar as referidas fendas formando uma rede de costura por forma a substituir a resistência do betão à tração [17].

Uma forma de dispor essas armaduras é através de associação do conjunto de varões longitudinais, distribuídos pelo contorno da secção, com armaduras transversais em formas de estribos envolvendo as armaduras longitudinais, tornando dessa forma a modelação à torção através duma treliça espacial, formados por tirantes e bielas comprimidas, [17]. Esse modelo é valido para cada uma das paredes da secção oca.

O método de cálculo a torção apresentado no EC2-1-1 consiste no cálculo das tensões tangenciais de torção  $\tau_{t,i}$  e dos esforços tangenciais  $V_{Ed,i}$ , dados pelas Equações 3.8 e 3.9 respetivamente.

$$\tau_{t,i} \times t_{ef,i} = \frac{T_{Ed}}{2 \times A_k} \quad (3.8)$$

Onde  $t_{ef,i}$  é a espessura eficaz da parede, que de acordo com [16] é da do por:  $t_{ef,i} = \frac{A}{u}$ , com  $A$  área total da secção transversal e  $u$  perímetro do contorno exterior da secção.

A espessura eficaz da parede  $t_{ef,i}$ , deve respeitar as seguintes condições:  $t_{ef,i} \geq 2 \times \left( c + \frac{\Phi}{2} \right)$  e para secções ocas não pode ser maior que a espessura da parede real (da alma da secção oca). Nessa Expressão  $c$  é o recobrimento das armaduras e  $\Phi$  o diâmetro das mesmas.

$$V_{Ed,i} = \tau_{t,i} \times t_{ef,i} \times z_i = \frac{T_{Ed}}{2 \times A_k} \times z_i \quad (3.9)$$

Em que  $A_k$  é a área delimitada pelas linhas médias das paredes, incluindo áreas interiores ocas,  $z_i$  é o comprimento da parede  $i$ ,  $T_{Ed}$  é o valor de cálculo do momento torsor,  $\tau_{t,i}$  é a tensão tangencial de torção e  $V_{Ed,i}$  o esforço tangencial. Os parâmetros das Equações 3.8 e 3.9 estão especificados na Figura 3.3 a baixo apresentada.

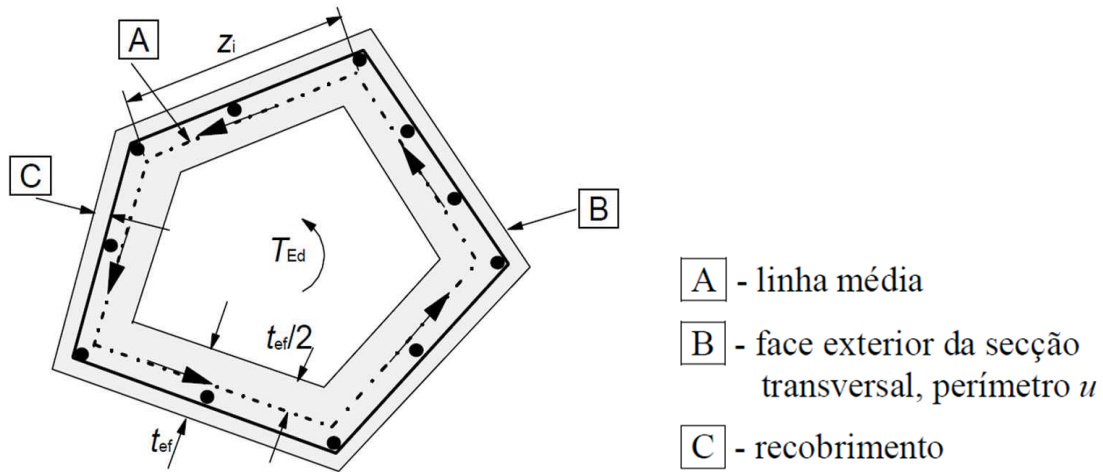


Figura 3.3: Notação dos termos utilizados para Expressões de cálculo da torção [16]

Os efeitos do esforço transversal e torção podem ser combinados entre si tanto para secções cheias como para secções ocas. Quando combinados esses dois efeitos a inclinação das escoras de betão são iguais tanto para a torção como para o esforço transversal, situando assim nos mesmos limites a quando da análise do esforço transversal, ou seja entre o intervalo seguinte:  $1 \leq \cot \theta \leq 2,5$  [16].

Quando é combinado o esforço transversal e a torção deve ser calculada de forma separada as áreas de armaduras de esforço transversal e torção.

A área transversal de armadura,  $A_{sw}$ , de torção é calculada pela Expressão 3.10 [18], obtida por equilíbrio de forças entre o esforço tangencial de torção,  $V_{Ed,i}$ , e o correspondente esforço resistente dado pela área transversal de armadura de torção.

$$\left( \frac{A_{sw}}{s} \right) \times f_{yd} \times z_i \times \cot \theta = V_{Ed,i} \Leftrightarrow \left( \frac{A_{sw}}{s} \right) \times f_{yd} \times z_i \times \cot \theta = \frac{T_{Ed,i}}{2 \times A_k} \times z_i \quad (3.10)$$

$$\left( \frac{A_{sw}}{s} \right) = \frac{T_{Ed}}{2 \times A_k \times f_{yd} \times \cot \theta}$$

A área da secção transversal da armadura longitudinal de torção,  $A_{sl}$ , pode ser calculada utilizando a Expressão 3.11 a seguir apresentada. A área longitudinal é obtida de forma análoga a transversal, isto é, pelo equilíbrio de forças entre a armadura longitudinal e a esforço tangencial de torção.

$$A_{sl} \times f_{yd} = V_{Ed,i} \times \cot \theta \Leftrightarrow A_{sl} \times f_{yd} = \frac{T_{Ed,i}}{2 \times A_k} \times z_i \times \cot \theta$$

$$\sum A_{sl} \times f_{yd} = \frac{T_{Ed} \times u_k \times \cot \theta}{2 \times A_k} \quad (3.11)$$

Onde  $T_{Ed}$  e  $A_k$  têm o mesmo significado que nas Expressões 3.8 e 3.9,  $u_k$  é o perímetro da área  $A_k$  e  $f_{yd}$  é o valor de cálculo da tensão de cedência da armadura longitudinal.

No EC2-1-1 é referido que, nos banzos comprimidos a armadura longitudinal poderá ser reduzido de forma proporcional a força de compressão instalada, enquanto nos banzos tracionados a armadura longitudinal deverá ser adicionado as outras armaduras [16].

A armadura longitudinal é distribuída em todo o comprimento, enquanto a armadura transversal, normalmente, é colocada de forma normal às últimas.

Em secções ocas para o efeito combinado do esforço transversal e torção as tensões de corte atuantes em cada parede somam-se e o dimensionamento da parede passa a ser feita da seguinte forma:  $V_{Ed,i} = (V_{Ed,i})_T + (V_{Ed,i})_V$ , com  $(V_{Ed,i})_T$  e  $(V_{Ed,i})_V$ , tensão tangencial de torção (esforço transversal de torção) e esforço transversal respetivamente [18].

A resistência máxima de um elemento sujeita ao efeito combinado de esforço transversal e torção é limitada pela resistência máxima das escoras de betão [16] e é traduzida pela condição seguinte:

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,max}} + \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \leq 1,0 \quad (3.12)$$

Com  $T_{Ed}$ , valor de cálculo do momento torsor,  $V_{Ed}$  Valor de Cálculo do esforço transversal,  $V_{Ed,max}$  esforço transversal resistente máximo, calculado de acordo com 3.6, e  $T_{Rd,max}$  valor de cálculo do momento torsor resistente, calculado de acordo com a Expressão 3.13.

$$T_{Rd,max} = 2 \times \nu \times \alpha_{cw} \times f_{cd} \times A_k \times t_{ef,i} \times \sin \theta \times \cos \theta \quad (3.13)$$

Os termos  $\nu$ ,  $\theta$  e  $\alpha_{cw}$  tem os mesmos significados que para o esforço transversal e os termos  $t_{ef}$  e  $A_k$ , são os definidos nas Expressões 3.8 e 3.9.

A verificação de segurança à torção para secções cheias é dispensável, quando é satisfeito a condição da Expressão 3.14, e para esses casos é dispensável a armadura de torção, podendo optar por colocar armaduras mínimas.

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,c}} + \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,c}} \leq 1,0 \quad (3.14)$$

O momento torsor fendilhado,  $T_{Rd,c}$  é calculado de acordo com a Equação 3.14 e o esforço transversal resistente,  $V_{Rd,c}$ , para elementos onde não seja necessário armadura de tração e obtida pela Expressão 3.15 [16].

$$T_{Rd,c} = 2 \times f_{ctd} \times A_k \times t_{ef,i} \quad (3.15)$$

Com  $f_{ctd}$  valor de cálculo da tensão de rotura de betão á tração.

$$V_{Rd,c} = \left[ C_{Rd,c} \times k \times (100 \times \rho_1 \times f_{ck})^{1/3} + k_1 \times \sigma_{cp} \right] \times b_w \times d \quad (3.16.a)$$

Com mínimo de:

$$V_{Rd,c} = (v_{\min} + k_1 \times \sigma_{cp}) \times b_w \times d \quad (3.16.b)$$

Em que:  $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$ , com  $d$  em mm;  $\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b_w \times d} \leq 0,02$ , onde  $A_{sl}$  é área de armadura de tração, calculada de acordo com secção 6.2.2 do EC2-1-1,  $\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} < 0,2 \times f_{cd}$ , com  $N_{Ed}$  esforço normal devido às ações aplicadas ou ao pré-esforço e  $A_c$  área da secção transversal de betão.

O EC2-1-1 indica que os valores de  $C_{Rd,c}$  e  $v_{\min}$  e  $k_1$  são indicados nos respetivos anexos nacionais, mas recomenda a utilização dos seguintes valores:  $C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c}$ ,  $k_1 = 0,15$  e

$$v_{\min} = 0,035 \times k^{3/2} \times f_{ck}^{1/2}.$$

Para além da combinação dos efeitos de torção com esforço transversal, também é possível existir uma combinação entre a torção e flexão e o esforço normal. Quando a torção surge associado a flexão (simples ou composta) a determinação das armaduras requeridas para a torção é determinada de forma separada das requeridas para a flexão. Deve-se dispor essas armaduras de acordo com os requisitos construtivos e de estabilidade [17].

Para a verificação de segurança, nos banzos a força longitudinal de tração requerida pelo tursor,  $T_{Ed}$ , deve ser somado às forças longitudinais requeridas pelo  $M_{Ed}$ , sendo que em banzos tracionados as forças de mesmo sinal devem ser somados, provocando assim um aumento da armadura longitudinal.

### 3.3.2. CÁLCULO DA TORÇÃO EM SECÇÕES EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Em situação de incêndio a análise de secções submetidas à torção é feita da mesma forma atrás apresentada e seguindo os pressupostos do anexo D do EC2-1-2.

Tal como no esforço transversal, a análise começa-se pela determinação da geometria reduzida da secção, após a execução da análise térmica, de acordo com o Método da Isotérmica dos 500°C ou o Método das Zonas.

A redução das características da secção transversal, (nomeadamente a base e a altura numa secção retangular ou quadrada), provoca uma redução direta quer na capacidade resistente à torção como na capacidade de resistente ao esmagamento do betão.

Quando secção estiver sujeita a elevadas temperaturas a redução das características da secção é mais agravada, ficando assim a secção com uma pior capacidade de resistir à torção e com uma gradual diminuição da espessura eficaz da parede,  $t_{ef,i}$ .

O EC2-1-2 não especifica que abordagem deve ser utilizada para a diminuição da espessura eficaz efetiva. Como poderá ser constado no próximo Capítulo, de acordo com os métodos de abordagem

proposto, espessura efetiva pode, além de sofrer uma grande redução, desaparecer, caso a redução da secção for drástica, fazendo com que a secção tenha uma capacidade nula de resistir à torção.

Quando altera-se as características da secção transversal, e consequentemente a espessura eficaz efetiva, para que a secção tenha uma capacidade de resistir aos efeitos combinado de esforço transversal e torção poderá ser necessário aumentar as áreas de armaduras transversais e longitudinais de torção, o que pode não ser possível por causa da percentagem máxima de armadura na secção. Uma outra consequência da redução da secção é na diminuição da capacidade resistente ao esmagamento do betão.

Quando aumenta a temperatura a geometria reduzida da secção provoca uma diminuição dos parâmetros  $t_{ef,i}$  e  $A_k$  da Equação 3.13 diminuindo assim o valor de cálculo do momento torsor resistente máximo,  $T_{Rd,max}$ , e na Equação 3.16 a diminuição dos parâmetros  $b_w$  e  $z$  da Equação 3.6 que provocam a diminuição do esforço transversal resistente máximo  $V_{Rd,max}$ . A diminuição de  $T_{Rd,max}$  e de  $V_{Rd,max}$  na Equação 3.12, levam a uma diminuição da capacidade resistente ao esmagamento do betão.

Após o cálculo da geometria reduzida, o passo seguinte consiste na determinação da capacidade resistente do betão à compressão e/ou à tração de acordo com o Método das Zonas, já que para Método da Isotérmica dos 500°C essas resistências mantem-se inalteráveis.

A redução da capacidade resistente do aço da armadura transversal de torção é determinada de acordo com a temperatura de referência a que a mesma estiver sujeita, sendo essa temperatura avaliada no ponto  $P$ , apresentado na Figura 3.4, por meio da aplicação do fator de redução, apresentada na Tabela 2.2 do presente trabalho.

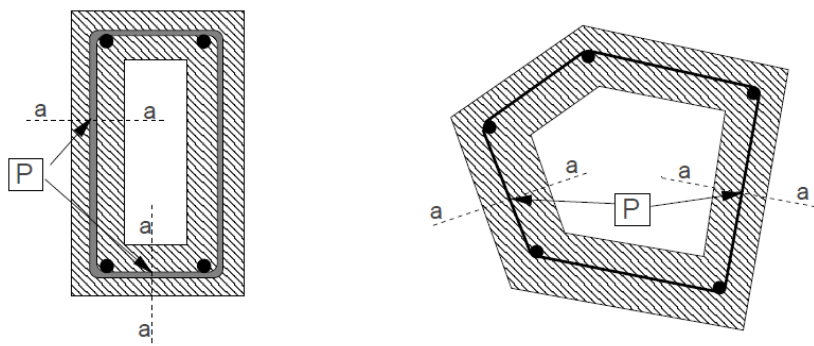


Figura 3.4: Localização do ponto para temperatura de referência nos estribos de torsão [1].

A localização do ponto para o cálculo de temperatura de referência, não é bem especificado no EC2-1-2, na Figura 3.4, extraída do mesmo código, pode-se ver os possíveis locais indicados para determinar a temperatura.

Como é visível na Figura 3.5, a temperatura nos dois pontos indicados, dependendo das características da secção, são próximas e essa proximidade tem pouca influência no fator de redução do aço.

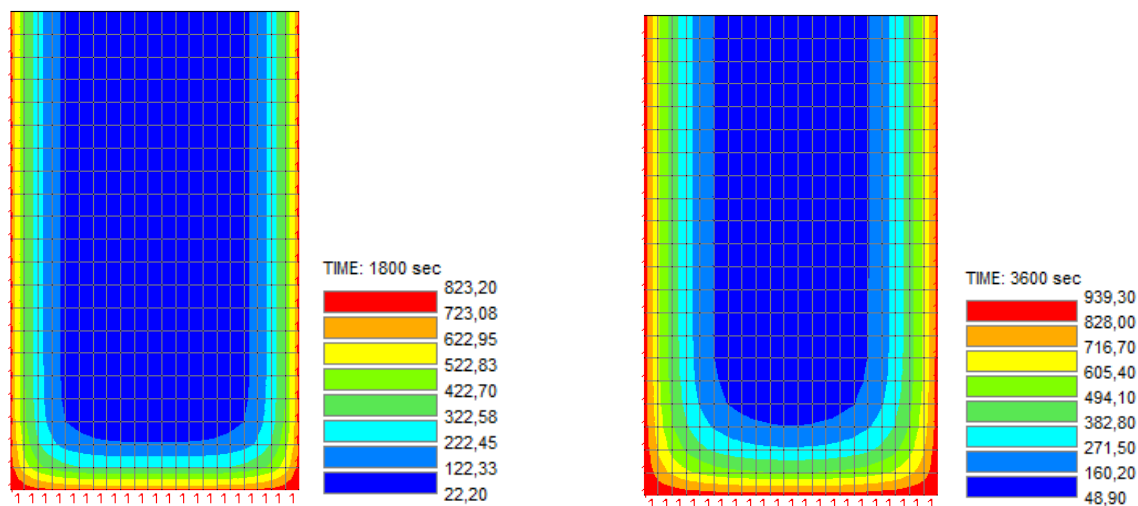


Figura 3.5: Variação com o tempo de temperatura numa secção de betão

Relativamente a temperatura no varão longitudinal de torção, não é feita nenhuma referência sobre a sua determinação no EC2-1-2, no entanto no Capítulo 4 desse trabalho será abordado as considerações tidas em conta para esse efeito.

### 3.3.2.1. Cálculo da torção utilizando o Método da Isotérmica dos 500°C

A verificação de segurança à torção e ao efeito combinado de torsão e esforço transversal feita pelo Método da Isotérmica dos 500°C obedece os mesmos princípios da utilização desse método, exposto no Capítulo 2.

Tal como exposto anteriormente, começa-se pela determinação da geometria reduzida, de acordo com a temperatura a que a secção estiver sujeita, seguido da determinação do fator de redução do estribo, após calcular a temperatura no ponto de referência indicado na Figura 3.4, sendo que as características resistentes do betão no interior da Isotérmica não se alteram.

Após seguir esses passos pode ser determinado a resistência à torção ou ao efeito combinado de torção e esforço transversal para uma dada secção em análise.

No cálculo da resistência à torção o ângulo das escoras comprimidas de betão pode ser determinado da mesma forma que para o esforço transversal, estando também no mesmo intervalo.

Para o cálculo da espessura eficaz da parede No EC2-1-2 não há indicações claras da sua execução quando se utiliza esse método, dado a essa ambiguidade pode ser feita algumas interpretações. Por isso nesse trabalho fez-se duas abordagens diferentes para o cálculo dessa espessura.

A primeira abordagem consiste em calcular a espessura eficaz da parede de acordo com as formulas apresentadas no EC2-1-2 para a secção à temperatura ambiente, após o qual será retirado a camada de betão com temperaturas superiores a 500°C, de acordo com a zona de passagem da Isotérmica dos 500°C. Essa abordagem vai de encontro da filosofia do Método da Isotérmica já que nesse método, a secção é reduzida tendo em conta a linha de passagem da Isotérmica dos 500°C. Mas por outro lado

nessa abordagem corre-se o risco de espessura efetiva atinge o valor mínimo num curto período de tempo.

A segunda abordagem feita nesse trabalho consiste em determinar a secção reduzida de acordo com a linha de passagem da Isotérmica dos 500°C e posteriormente calcular a espessura eficaz da parede com as características da secção reduzida. Nessa abordagem a espessura dificilmente desaparece no seu todo com o aumento de temperatura, apesar de sofrer gradualmente uma diminuição à medida que a temperatura aumenta.

Posteriormente será retomada esse assunto, trazendo resultados de exemplos estudados para uma melhor comparação das duas alternativas propostas.

### 3.3.2.2. Cálculo da torção utilizando o Método das Zonas

Os pressupostos utilizados para o cálculo da torção pelo Método da Isotérmica dos 500°C também são válidas para o Método das Zonas, mas é acrescentado a determinação da fator de redução do betão.

Para o cálculo da espessura eficaz da parede também pode ser feita as duas abordagens a cima mencionadas, isto é, pode-se calcular essa espessura para uma secção à temperatura ambiente e depois, de acordo com a alteração das características da secção, retirar a zona danificada  $a_z$ , apresentada anteriormente, ou pode-se calcular primeiro a zona danificada  $a_z$  e posteriormente calcular, a partir da geometria reduzida, a espessura eficaz  $t_{ef}$ .

No que se refere á divisão da secção em várias zonas, ao transformar uma secção cheia numa secção oca não é especificado no EC2-1-2 se a temperatura a ter em conta é do meio oco ou do material que anteriormente constituía a secção.

Essa dúvida é preponderante na medida em que se o meio for oco a temperatura pode ser diferente do que para a secção cheia devido as diferenças nas propriedades térmicas. Por exemplo ao dividir uma secção em várias zonas se uma parte desta zona estiver na área oca e outra na alma, dado que a temperatura é calculada no meio a zona (que pode estar ou do lado oco ou da alma), não se sabe a temperatura a considerar é da zona oca ou da alma.





## 4 DESENVOLVIMENTO DA APLICAÇÃO COMPUTACIONAL

### 4.1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho foi desenvolvido duas aplicações computacionais para a análise da resistência ao corte de estruturas de betão armado em situação de incêndio com base nos métodos de cálculo simplificados apresentados no EC2-1-2.

Uma aplicação virada unicamente para a verificação ao esforço transversal, intitulada de *Comportamento ao corte de elementos de betão armado em situação de incêndio - Esforço Transverso* e uma outra virada para a verificação da torção e da torção combinada com o esforço transversal, intitulada de *Comportamento ao corte de elementos de betão armado em situação de incêndio - Torção*.

Ao analisar os métodos de cálculos apresentados no EC2-1-2 para o cálculo ao corte de estruturas de betão armado em situação de incêndio verifica-se que, independentemente do método utilizado, o cálculo é muito moroso com diversos procedimentos o que, se na análise não for tomada as devidas precauções, pode facilmente induzir a erros.

Um outro aspeto a realçar tem a ver com a análise térmica que é necessário fazer para a análise numa secção em situação de incêndio. Como a temperatura na secção varia de ponto para ponto e em cada instante de tempo, as características do material também variam nesses domínios pelo que as suas determinações por via manual são extremamente difíceis. Para simplificar esse aspeto o EC2-1-2 indica no seu anexo A perfis de temperatura que possam ser utilizados, mas os mesmos são limitativos as secções presentes nesse mesmo anexo.

Daí um dos objetivos do desenvolvimento das aplicações computacionais aqui apresentadas é ultrapassar as barreiras acima referidas, com a análise térmica feita automaticamente a partir da ligação com programa de cálculo avançado, o SAFIR [19], permitindo a execução da análise em cada instante de tempo.

As aplicações foram desenvolvidas utilizando a linguagem MATLAB [20].

### 4.2. MÉTODOS DE ANÁLISE

As metodologias de análise utilizada nas duas aplicações são baseadas nos métodos simplificados apresentados no EC2-1-2.

Na análise do esforço transversal é utilizado tanto o Método da Isotérmica dos 500°C como o Método das Zonas.

Para a torsão a análise é feita com base no Método da Isotérmica dos 500°C, sendo que foi apresentado duas alternativas de análise a partir desse método. Estas alternativas foram denominadas de Alternativa\_1 e Alternativa\_2.

Na Alternativa\_1 o método de cálculo consiste em determinar a geometria reduzida da secção de acordo com a linha da Isotérmica dos 500°C e a partir desta geometria calcular a espessura eficaz da parede (secção), a área delimitada pela linha média dessa espessura e o respetivo perímetro. Estes parâmetros são utilizados nas fórmulas convencionais de verificação de segurança à torsão aqui apresentados.

Pela Alternativa\_2 primeiro é calculado a espessura eficaz da secção à temperatura ambiente e de seguida esta espessura é reduzida de acordo com a localização da Isotérmica dos 500°C, obtendo assim a espessura eficaz final a utilizar. A partir desta espessura eficaz e da geometria reduzida é determinada a área delimitada pela linha média da referida espessura e o respetivo perímetro.

A verificação da segurança para a torsão é feita tanto para a torsão isolada como para a torsão combinada com o esforço transversal e pode ser analisada tanto secções cheias como secções ocas.

Na análise da secção oca admite-se que a temperatura no interior da zona oca não atinge valores iguais ou superiores a 400°C

Podem ser analisadas secções retangulares. Podem ser também analisadas secções em T tendo em conta as áreas das armaduras de flexão a introduzir é controlado pelo utilizador. Quando é analisado uma secção em T as faces expostas ao fogo são equivalentes à de uma secção retangular.

As hipóteses de análise térmica consideradas nas aplicações desenvolvidas são as mesmas consideradas no SAFIR.

A análise térmica é feita a secções de betão sendo atribuídos às armaduras as temperaturas das fibras de betão nos pontos correspondentes.

As temperaturas a serem utilizadas na redução das propriedades do aço dependem da utilidade deste. Para as armaduras longitudinais a temperatura é determinada no canto inferior da secção (caso duma viga), para armadura de esforço transversal e armadura transversal de torsão é determinado de acordo com a localização do estribo e a uma altura  $h_{ef}$  especificado no Capítulo 2.

A temperatura utilizada para calcular a fator de redução do betão à compressão é calculada de acordo com o Método das Zonas e só é aplicável quando utilizado este método.

#### 4.3. ORGANIZAÇÃO E FUNCIONAMENTO DAS APLICAÇÕES DESENVOLVIDAS

Um outro objetivo dessas aplicações é fazer com que a análise ao corte seja feita de forma rápida, com resultados credíveis, através de cálculo das resistências com base nas temperaturas obtidas de acordo com a variação do tempo.

Para que as aplicações fossem simples e de fácil aplicação elas foram organizadas, como apresentado na Figura 4.1, em três fases distintas, a primeira fase onde é introduzida todos os dados necessários para o tratamento na segunda fase e para a posterior apresentação dos resultados na última etapa.



Figura 4.1: Método geral de análise

#### 4.3.1. INTRODUÇÃO DE DADOS

A forma e o procedimento de introdução de dados é a mesma nas duas aplicações desenvolvidas, as principais diferenças tem a ver com o número e tipo de dados que são introduzidos em cada uma delas. Para a torção é introduzido todos os dados utilizados no esforço transversal, acrescentando as armaduras de torção e as ações da mesma. Por isso a introdução de dados é abordado em conjunto.

Na fase da introdução de dados inclui-se as características da secção em análise, que serão utilizados para a execução da análise térmica, o tempo de duração da análise térmica e mecânica, as propriedades resistentes dos materiais e as ações atuantes em situação de incêndio.

As características da secção introduzidas serão utilizadas tanto para o efeito de análise térmica, para a geração do ficheiro interior no SAFIR, como para a análise mecânica, no cálculo dos esforços resistentes. Estas características devem ser da secção à temperatura ambiente, a partir das quais o programa determinará a geometria da secção reduzida a utilizar durante o tempo de análise

As propriedades a serem introduzidas são as propriedades mecânicas do aço e do betão, sendo que as térmicas são calculadas interiormente no programa através da conexão com o SAFIR que, também utiliza o tempo de duração da análise introduzido e as propriedades térmicas do betão e do aço, já incorporados nele, para a execução da análise térmica.

As condições de análise térmica indicados no fluxograma da Figura 4.2 são relativos ao número de faces expostas ao fogo e a definição das malhas do elemento que se pretende utilizar para a análise. Os números dos elementos finitos que constituem a malha são definidos de acordo com a dimensão que se pretende para o elemento, sendo que essas dimensões são obtidas a partir das características da secção e do número de linhas e colunas fornecidos.

As ações em situação de incêndio introduzidas devem ser de acordo com o exposto no EC2-1-2 e expostas no Capítulo 2, sendo a ação a introduzir resultante da combinação quase permanente de ações ou então a partir dos efeitos das ações à temperatura ambiente multiplicado pelo fator de redução apresentado na Expressão 2.22.

Outros dados necessários a introduzir pelo utilizador são os parâmetros de resistência. Para que seja feita a análise da secção quando submetida ao fogo, ela terá que estar analisada a frio e com base nessa análise feita a frio prossegue-se a análise térmica.

Os principais parâmetros a introduzir são os ângulos, da espora comprimida e dos estribos, as armaduras e os espaçamentos dos estribos, as armaduras de flexão e para o caso da verificação à torsão, as armaduras de torsão.

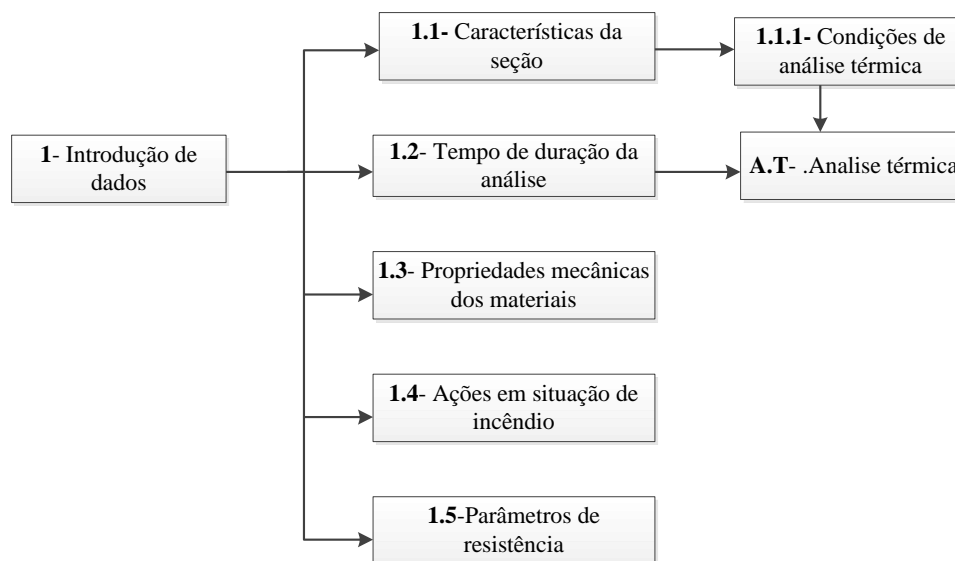


Figura 4.2 Organização dos dados introduzidos

Para o tratamento dos dados é utilizado, para além dos dados fornecidos pelo utilizador, dados fornecidos pelo programa SAFIR resultantes da análise térmica feita pelo mesmo. Estes dados são basicamente as temperaturas a cada incremento de tempo de análise, em intervalos de um minuto, até ao tempo máximo fornecido pelo utilizador para a análise térmica.

O programa SAFIR, para fornecer esses dados, necessita, para além das características da secção, incluindo a definição das malhas, e do tempo de análise, das propriedades térmicas dos materiais, Aço e betão, os quais já o tem incorporado (utiliza as propriedades de acordo com o Eurocódigo 2 e 3), dum ficheiro com extensão .IN a partir da qual é executada a análise.

O ficheiro com extensão .IN é gerado de forma automática pelo utilizador nas aplicações desenvolvidas e é utilizado pelo SAFIR para a execução da análise térmica. Os resultados desta análise são fornecidos em dois ficheiros, uma com extensão .OUT e outra com extensão .TEM, que fornecem as temperaturas nas fibras e nos nós dos elementos finitos, definidos anteriormente. As extensões aqui indicadas são no formato ASCII. É utilizado os dados fornecidos pelo ficheiro com extensão .OUT para execução da análise mecânica.

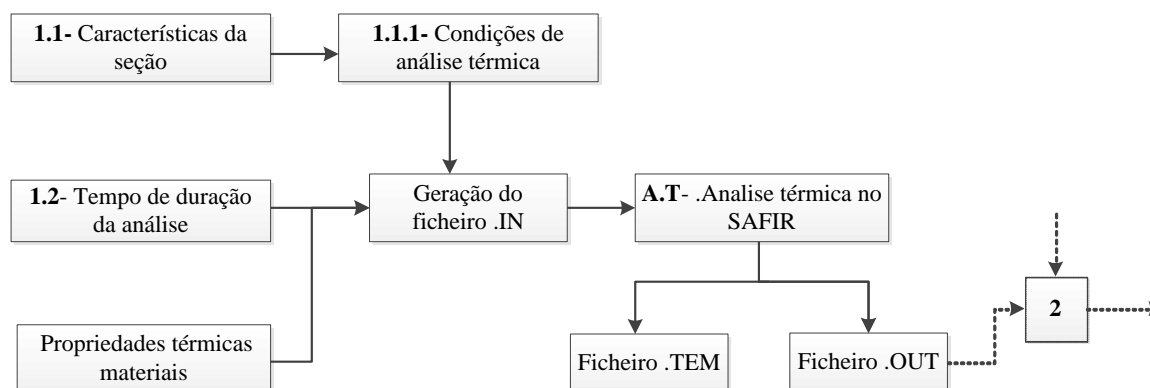


Figura 4.3: Fluxograma de dados de entrada e saída na análise térmica

Na Figura 4.3 é apresentada os dados necessários a serem fornecidos ao programa SAFIR na utilização do mesmo nos programas desenvolvidos neste trabalho.

#### 4.3.2. TRATAMENTO DE DADOS

O tratamento dos dados é feito de forma diferenciada, cada uma das duas aplicações desenvolvidas possui a sua forma específica de tratamento, mas duma forma geral é o cálculo das respetivas resistências, de acordo com as opções escolhidas.

##### 4.3.2.1 ESFORÇO TRANSVERSO

Para o tratamento dos dados começa-se por avaliar as temperaturas nos elementos, de acordo com os pontos e as localizações específicas para cada fim. Estas temperaturas são utilizadas para redução da geometria da secção, e da resistência do aço e do betão.

Quando o método de cálculo escolhido for o Método da Isotérmica dos 500°C é utilizada a geometria reduzida e as propriedades reduzidas do aço, sendo que as propriedades do betão permanecem iguais à temperatura ambiente.

Quando for escolhido o Método das Zonas para execução da análise é utilizado tanto a redução da geometria da secção como a redução das propriedades do aço e do betão.

Para cada incremento de tempo é feita o cálculo das resistências da secção e estas resistências são comparadas com os esforços atuantes. Se os esforços atuantes forem menores que os resistentes então a secção resiste e é feito um incremento de tempo para o qual será feita uma nova avaliação das temperaturas e novos cálculos das resistências. Este ciclo prossegue terminado quando a secção já não resiste ao aumento de temperatura, ocorrendo assim a rotura.

No fluxograma da Figura 4.4, é apresentada os passos genéricos dados durante o a análise dos dados para a posterior devolução dos resultados.

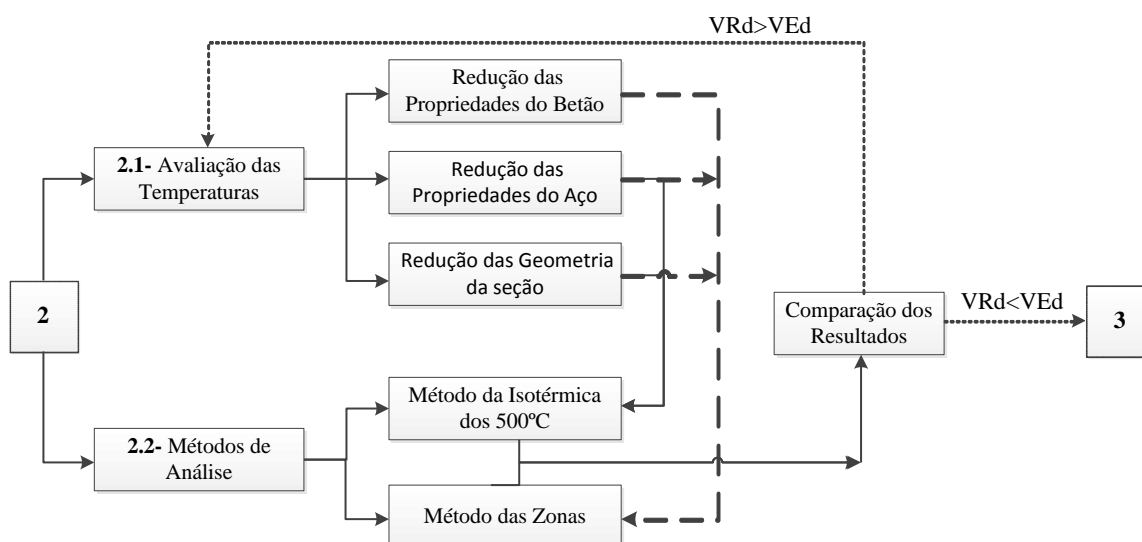


Figura 4.4: Procedimento geral na análise dos dados para o Esforço Transverso

#### 4.3.2.1 TORÇÃO

Na torção só é utilizada o Método da Isotérmica dos 500°C para a análise das secções em situação de incêndio, por isso a avaliação de temperatura feita é utilizada para a redução da geometria da secção e da resistência à tração do aço quer para a análise da torsão isolado como para a análise da torção combinada.

Quando o método de cálculo escolhido for o Método da Isotérmica dos 500°C é utilizada a geometria reduzida e as propriedades reduzidas do aço, sendo que as propriedades do betão permanecem iguais à temperatura ambiente.

Na Figura 4.5 é apresentada os procedimentos gerais executados internamente pela aplicação durante a execução das análises.

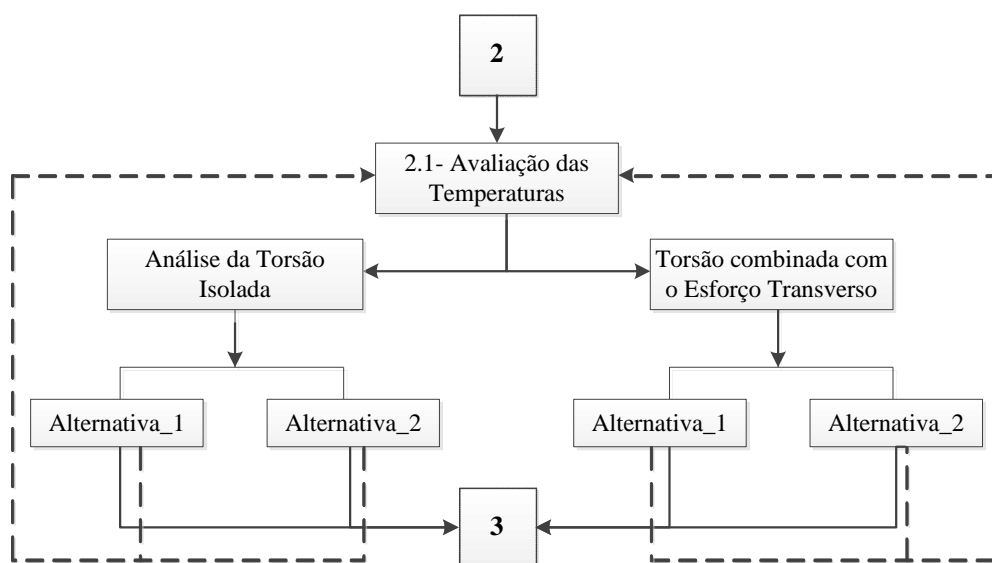


Figura 4.5: Procedimento geral na análise dos dados para a Torsão.

#### 4.3.2. RESULTADOS

Os resultados obtidos são fornecidos numa interface gráfica precedidos de um aviso com as causas das roturas da secção para o tempo a qual a mesma é capaz de resistir ao incêndio.

Os principais resultados fornecidos são: O tempo a que a secção é capaz de resistir aos esforços atuantes e os esforços atuantes para esse tempo limite. Para o Esforço Transverso é ainda fornecido o ângulo ótimo da escora comprimida de betão.

Na Figura 4.6 é apresentado um exemplo da forma como é fornecido os resultados pelas aplicações, sendo apresentado no Anexo A mais exemplos.

**FEUP - Mestrado Integrado em Engenharia Civil 2012-2013**  
**Comportamento ao corte de elementos de Betão Armado em Situação de Incêndio**  
**Torção**

**Secção**

b (m)

h (m)

rec. (cm)

A secção é oca?  
☐ Sim ☒ Não tef (m)

**Ações em situação de incêndio**

Ted (kN.m)

Ved,t (kN)

Ned,t (kN)

**Materiais**

fck (Mpa)

**Análise Térmica**

Nº Colunas

Tempo de Análise Térmica (min)

**Faces expostas ao fogo (I. P.)**

☐ Face Superior

☒ Face Esquerda ☒ Face Direita

☒ Face Inferior

**Armaduras de Torção**

Area Longitudinal (cm²/m)

Area Transversal (cm²/m)

Angulo da escora (°C)

Tempo de Análise Mecânica (min)

**Armaduras**

Diâmetro estribo (mm)

Espaçamento do estribo (m)

Angulo alfa (°C)

**Dois diâmetros**

Nº

D (mm)

Nº-1  Nº-2

D-1 (mm)  D-2 (mm)

**Metodo de cálculo**

Análise da Torção

☐ Isolado

☒ Combinado

Isotermica dos 500°C

☐ Alternativa 1

☒ Alternativa 2

**Resultado**

A secção analisada resiste durante  minutos de fogo (I.P.)

**Resultado**

Trd,t (kN.m)

Vrd,t (kN)

Mrd,t (kN.m)

Aluno: Adriano Baptista Gonçalves      Orientador: Professor Doutor Rui Faria

Figura 4.6: Fornecimento dos resultados da análise





## 5. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

### 5.1. INTRODUÇÃO

A verificação da resistência ao esforço transversal e à torção nas estruturas de betão armado em situação de incêndio estão insuficientemente tratadas no Eurocódigo 2 Parte 1-2.

As indicações dadas neste código são de difícil execução manual dado a variação de temperatura em cada ponto da secção e a variação dos esforços resistentes ao longo do tempo de análise.

Para validar a aplicação computacional desenvolvida para a verificação da segurança ao corte de elementos de betão armado será feita alguns exemplos práticos manuais que serão posteriormente comparadas com os resultados obtidos pelas aplicações desenvolvidas.

Começa-se por analisar o comportamento ao esforço transversal de algumas secções de betão armado em situação de incêndio, seguido da torção e por fim do efeito combinado do esforço transversal com a torção.

Antes de fazer a análise em situação de incêndio faz-se uma análise à temperatura ambiente de forma a fazer análises com resultado mais realista possível.

### 5.2. ESFORÇO TRANSVERSO

Para a validação da aplicação desenvolvida será feita dois Exemplos da análise ao esforço transversal. Uma em que a capacidade da secção é condicionada pelo esgotamento da capacidade resistente dos estribos denominada de Exemplo A.1 e uma outra em que a capacidade é condicionada pelo esmagamento das escoras comprimidas de betão, denominada de Exemplo A.2. Nos dois exemplos serão analisados vigas expostas ao Incêndio Padrão nas três faces, e admitindo que a face superior encontra-se protegida pela laje.

No Exemplo A.1 será analisada uma viga simplesmente apoiada, apresentada na Figura 5.1 a), com um vão de 7 m e solicitada por uma ação à temperatura ambiente de  $E_d = 53,20 \text{ KN/m}^2$  (após ser feita as combinações) e os materiais a utilizar são o aço A500NR e o betão B25/30.

No Exemplo A.2 será analisada uma viga com um vão de 6 metros, simplesmente apoiada e com uma solicitação à temperatura ambiente de  $E_d = 120,00 \text{ KN/m}^2$ . Os materiais a utilizar nesse segundo Exemplo são um betão B20/25 e o aço A500NR.

Os fatores de segurança, à temperatura ambiente, a utilizar são de  $\gamma_s = 1,15$  e  $\gamma_s = 1,50$  para o aço e betão respetivamente. Em situação de incêndio esses fatores são de valores unitários.

Para a modelação ao fogo, aplicou-se o fator de redução para o valor de cálculo das ações de  $\eta_{fi} = 0,70$ , recomendado pelo EC2-1-2, ao valor de cálculo do efeito das ações à temperatura ambiente, obtendo o efeito de cálculo da ação para dimensionamento em situação de incêndio de  $E_{fi,d,t} = 37,24 \text{ KN/m}^2$  e de  $E_{fi,d,t} = 84,00 \text{ KN/m}^2$  para o Exemplo A.1 e A.2 respetivamente.

### 5.2.1. EXEMPLO A.1: ROTURA CONDICIONADA PELO ESGOTAMENTO DA CAPACIDADE DOS ESTRIBOS

Para esse exemplo estudou-se uma viga retangular de secção  $30 \times 60 \text{ cm}^2$ , com um recobrimento de 3cm, com as características e ações como o a baixo indicado (Figura 5.1), com vão de 7 m, simplesmente apoiada e uma carga à temperatura ambiente de  $53.20 \text{ KN/m}^2$ , para o caso em análise admite que não existe esforço normal ( $N_{Ed} = 0$ ).

Será feita uma análise manual, com base nos métodos de cálculo simplificados do EC2-1-2, que serão comparados com os resultados da aplicação desenvolvida.

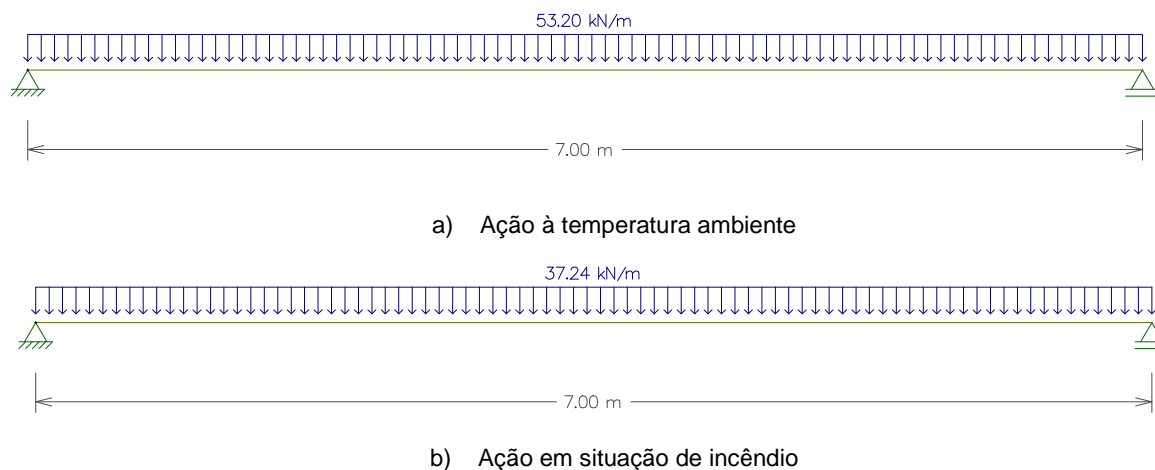


Figura 5.1: Ações a utilizar no Exemplo A.1

#### 5.2.1.1. Cálculo à temperatura ambiente

O primeiro passo consiste na verificação da necessidade da armadura de esforço transversal, calculado utilizando a Equação 3.15 apresentada no Capítulo 3, desta forma tem-se:

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} = 0,12, \text{ para } \gamma_c = 1,5$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \Leftrightarrow k = 1 + \sqrt{\frac{200}{570}} \leq 2,0 \Leftrightarrow k = 1,59 < 2 \Leftrightarrow k = 1,59 \quad (5.1)$$

$$\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b_w \times d} \leq 0,02$$

Com base no diagrama de momentos para a ação à temperatura ambiente, apresentado na Figura 5.2 e utilizando as Tabelas apresentadas em [21] pode-se obter o momento reduzido e a percentagem mecânica das armaduras.

$$\mu = \frac{M_{Rd}}{b_w d^2 f_{cd}} = \frac{325,8}{0,30 \times 0,57^2 \times 16,667 \times 10^3} = 0,201$$

De acordo com o ábaco apresentado em [21]  $\omega = 0,226$  e a área de armadura  $A_{sl}$  será: (5.2)

$$A_{sl} = b_w d \omega \frac{f_{cd}}{f_{syd}} = 14,81 \text{ cm}^2 \text{ logo } \rho_1 = 8,66 \times 10^{-3} \leq 0,02$$

O valor do esforço transversal resistente, caso não seja necessário armadura de esforço transversal é:

$$V_{Rd,c} = \left[ C_{Rd,c} \times k \times (100 \times \rho_1 \times f_{ck})^{1/3} + k_1 \times \sigma_{cp} \right] \times b_w \times d = 90,95 \text{ kN},$$

Com o mínimo de: (5.3)

$$V_{Rd,c \min} = (v_{\min} + k_1 \times \sigma_{cp}) \times b_w \times d = 59,99 \text{ kN}$$

Logo  $V_{Rd,c} = 90,95 \text{ kN} < 186,2 \text{ kN}$ , portanto é necessário armadura de esforço transversal.

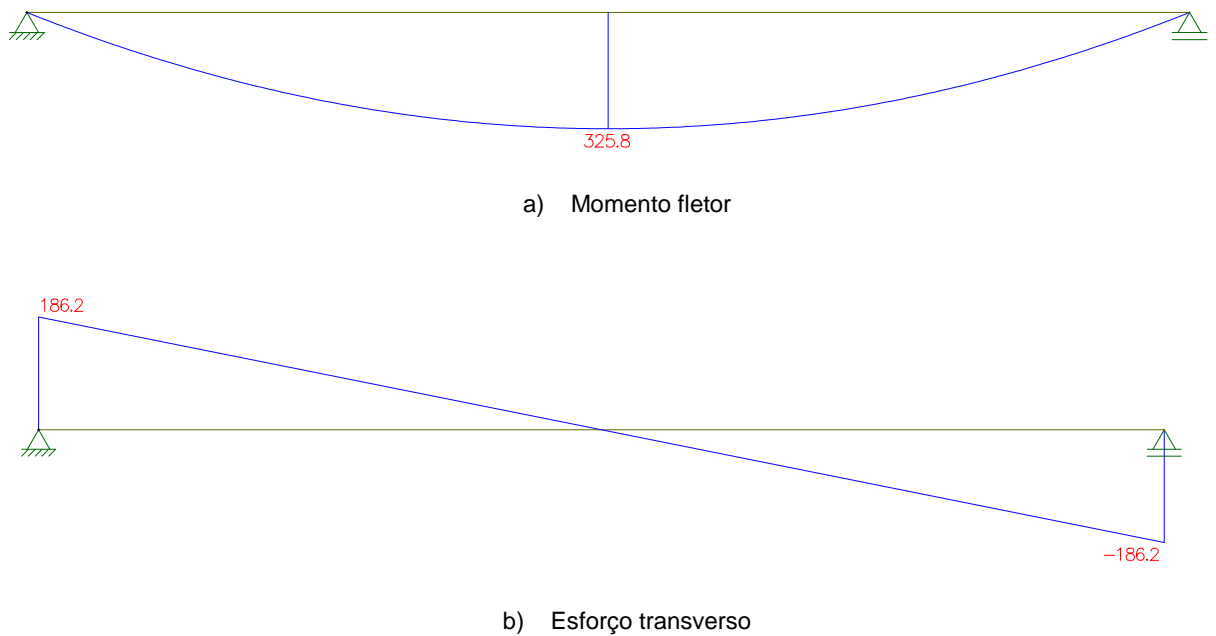


Figura 5.2: Esforço atuante à temperatura ambiente para o Exemplo A.1

Para o cálculo da área de armadura de esforço transversal é necessário conhecer os ângulos  $\alpha$ , entre o estribo e o eixo da peça, nesse caso admite-se  $90^\circ\text{C}$ , e o ângulo da escora comprimida  $\theta$ , que é obtida

igualando as Expressões 3.1 e 3.2, que são as Expressões do esforço transversal resistente e esforço transversal resistente máximo.

Para que a peça resista ao esforço transversal atuante de  $186,2\text{KN}$ , o esforço resistente terá que ser pelo menos igual a esse valor, dessa forma o esforço transversal resistente, dada pela Equação 3.1, é de  $186,2\text{KN}$  e tem-se:

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \times b_w \times z \times v_1 \times f_{cd}}{(\cot \theta + \tan \theta)} = 186,2$$

$$\Leftrightarrow 186,2 = \frac{1 \times 0,30 \times 0,9 \times 0,57 \times 0,54 \times 16,667 \times 10^3}{\left( \cot \theta + \frac{1}{\cot \theta} \right)} \quad (5.4)$$

$$\Leftrightarrow 186,2 \cot^2 \theta - 1385,13 \cot \theta + 186,2 = 0 \Leftrightarrow \cot \theta = 7,30 \cup \cot \theta = 0,14$$

Ao resolver a Equação em função do  $\cot \theta$  obtém-se dois valores de  $\cot \theta$  que estão fora do intervalo estipulado no EC2-1-1, por isso admite-se  $\cot \theta = 2,5$ . Para obter a armadura mínima capaz de resistir ao esforço atuante resolve-se a Equação 3.1 em função da área de armadura de esforço transversal resistente com o esforço transversal resistente igual ao atuante. Dessa forma a área de armadura de estribo será:

$$\left( \frac{A_{sw}}{S} \right)_{\min} = \frac{0,08 \sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \times b = 2,40 \text{cm}^2 / \text{m}$$

$$\frac{A_{sw}}{S} = \frac{V_{Rd,s}}{z \times f_{ywd} \times \cot \theta} = 3,34 \text{cm}^2 / \text{m} > \left( \frac{A_{sw}}{S} \right)_{\min} \quad (5.6)$$

O esforço transversal resistente  $V_{Rd,s} = 186,2\text{KN}$  e o esforço transversal máximo a partir da qual pode ocorrer esmagamento do betão, calculada de acordo com a Expressão 3.2 desse trabalho, é de  $V_{Rd,max} = 477,63\text{KN}$ , conforme pode ser confirmado a baixo.

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \times b_w \times z \times v_1 \times f_{cd}}{(\cot \theta + \tan \theta)} = \frac{1 \times 0,30 \times 0,9 \times 0,57 \times 0,54 \times 16,667 \times 10^3}{\left( \cot \theta + \frac{1}{\cot \theta} \right)} = 477,63\text{KN} \quad (5.7)$$

A rotura por esgotamento da capacidade resistente do estribo ocorre quando o esforço transversal resistente que este estribo é capaz de oferecer à secção é menor que o esforço transversal atuante.

#### 5.2.1.2. Cálculo em situação de incêndio

Para a análise da rotura por esgotamento da capacidade resistente dos estribos prossegue-se a análise pelos dois métodos simplificados apresentados anteriormente, pelo Método da Isotérmica dos  $500^\circ\text{C}$  e pelo Método das Zonas. A viga em análise está exposta ao Incêndio Padrão nas três faces e sujeita a um tempo de análise térmica com uma duração de 60 minutos.

As ações atuantes em situação de incêndio foram obtidos a partir do esforço à temperatura ambiente aplicado o fator de redução  $\eta_{fi} = 0,7$  do qual obteve-se o efeito de cálculo das ações em situação de incêndio de  $E_{fi,d,t} = 37,24 \text{ KN} / \text{m}^2$ . Para este valor do efeito das ações estão representados na Figura 5.3 a) e b) os valores do momento fletor e do esforço transversal, respetivamente.

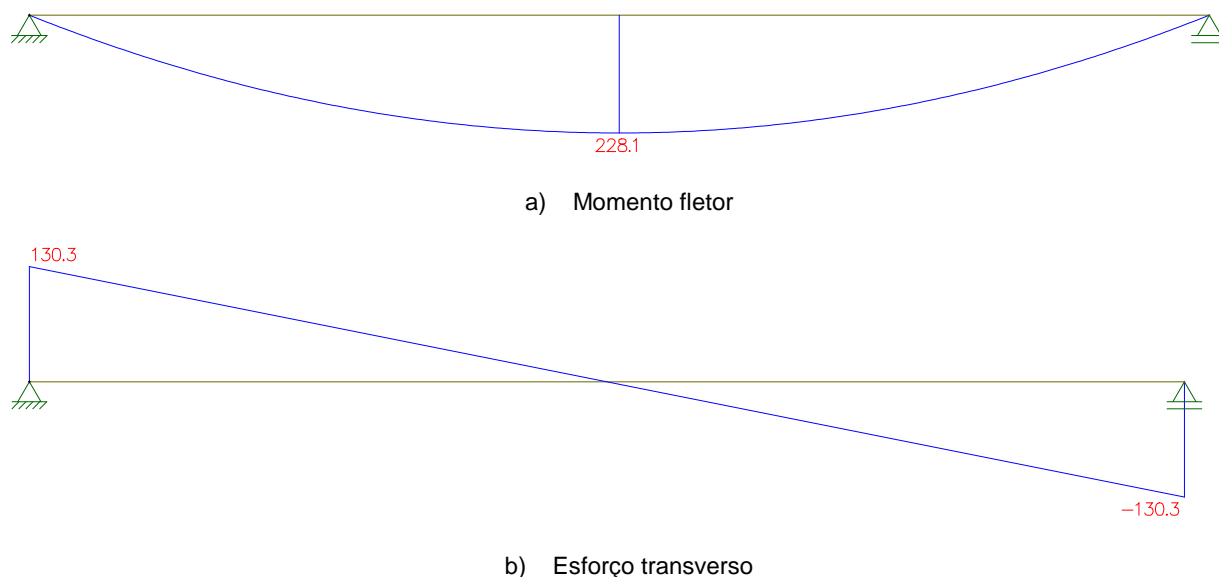


Figura 5.3: Esforço atuantes em situação de incêndio para o Exemplo A.1

Em situação de incêndio a carga atuante é menor do que a carga à temperatura ambiente (depende do fator  $\eta_{fi}$  utilizado), mas a área de armadura do estribo utilizada numa secção mantém-se constante à medida que a capacidade resistente da secção ao esforço transversal diminui com o aumento do tempo de fogo.

À medida que o tempo de exposição ao fogo aumenta a temperatura aumenta e as propriedades resistentes dos materiais diminuem. Quando essa diminuição for de tal forma que a capacidade resistente ao esforço transversal em situação de incêndio não seja suficiente para suportar o esforço transversal atuante em situação de incêndio, então haverá uma rotura por esgotamento da capacidade do estribo.

Para a análise em situação de incêndio, é utilizado as armaduras de esforço transversal calculados à temperatura ambiente, pois são estas que garantam a resistência da secção ao esforço transversal, seguidos da redução das propriedades do betão e do aço de acordo com a temperatura a que estiverem sujeitas. Como não se conhece a temperatura instalada na secção por não saber à priori qual o tempo máximo que a secção pode resistir admite-se um tempo de análise de 56 minutos, obtendo a distribuição de temperatura na secção de acordo com a Figura 5.4.

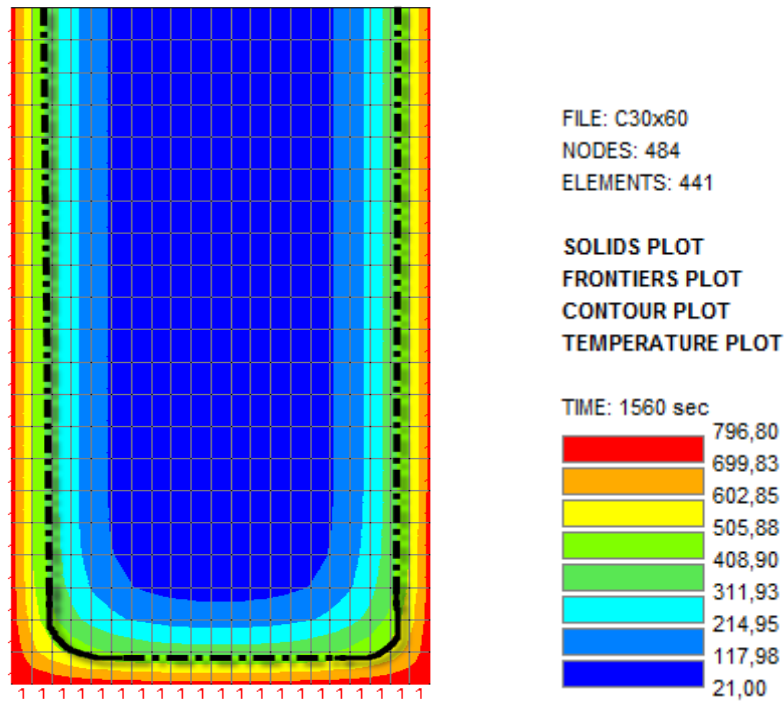


Figura 5.4: Temperatura na secção exposta durante 56 minutos de Incêndio Padrão

a) Análise pelo Método da Isotérmica dos 500°C

Ao utilizar o Método da Isotérmica dos 500°C primeiro passo consiste na redução das características da secção. Analisando a Figura 5.4 pode-se verificar que ao retirar a área cuja temperatura é superior a 500°C, limitada pela linha a traço e ponto, a geometria reduzida passa a ser de  $24,29 \times 54,29 \text{ cm}^2$ .

O passo seguinte é o cálculo do fator de redução do aço do estribo. Esse fator é calculado de acordo com a temperatura no aço a uma altura  $h_{ef}$ , calculada de acordo com a Equação 5.8 apresentada a baixo

$$h_{c,ef} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{2,5 \times (h - d)}{3} \\ \frac{(h - x)}{3} \\ \frac{h}{2} \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{2,5 \times (0,60 - 0,57)}{3} \\ \frac{(0,60 - x)}{3} \\ \frac{0,60}{2} \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,075 \\ \frac{(0,60 - x)}{3} \\ 0,30 \end{array} \right\} \quad (5.8.a)$$

Como é visível na Equação (5.8.a) é necessário calcular a altura do eixo neutro, que pode ser calculado aplicando o equilíbrio de forças, de acordo com a Equação de equilíbrio (5.9.a) apresentada abaixo e admitindo um bloco retangular de distribuição de tensões no betão no cálculo do momento fletor resistente.

$$M_{Rd} = F_c \times z = F_s \times z \Leftrightarrow f_{cd,di} \times 0.8 \times x \times b = A_s \times f_{yd,fi} \Leftrightarrow x = \frac{A_s \times f_{yd,fi}}{f_{cd,fi} \times 0.8 \times b} \quad (5.9.a)$$

Para prosseguir com o cálculo é necessário calcular o fator de redução do aço da armadura longitudinal de tração de acordo com a temperatura a que está submetida durante o tempo considerado. Esta avaliação é feita no centro geométrico da armadura de canto.

A temperatura da armadura longitudinal é de 634,6°C. Para calcular o fator de redução utiliza-se a Tabela 2.2, mas como o valor não é exato prossegue-se a uma interpolação linear para o cálculo do fator de redução.

$$k_s(\theta) = 0.47 - (\theta - 600) \times ((0.47 - 0.23) / (700 - 600)) = 0.389$$

$$f_{yd,fi} = k_s(\theta) \times f_{yd} = 193.5 \text{ MPa} \quad (5.9.b)$$

Para o Método da Isotérmica dos 500°C o betão conserva-se a sua propriedade mecânica de resistência à compressão, portanto continua 25 MPa, desta forma o valor de  $x$  é apresentada na Expressão 5.9.c).

$$x = \frac{A_s \times f_{yd,fi}}{f_{cd,fi} \times 0.8 \times b} = \frac{14.81 \times 10^{-4} \times 193.5}{25 \times 0.8 \times 0.2429} = 0.059 \quad (5.9.c)$$

Substituindo os valores na Equação 5.8.a) a altura será de:

$$h_{c,ef} = \min \left\{ \frac{0.075}{\frac{(0.60 - 0.059)}{3}}, 0.075, 0.180, 0.30 \right\} = 0.075 \quad (5.8.b)$$

Para o tempo de análise o valor do momento fletor resistente também sofre uma redução provocada pelo aumento de temperatura. Este aumento de temperatura é materializado tanto pela redução das dimensões da secção como pela redução das características de resistência à tração do aço de armadura longitudinal.

$$M_{Rd,fi} = A_s \times 0.9 \times d \times f_{yd,fi} = 14.81 \times 10^{-4} \times 0.9 \times 0.57 \times 193.5 \times 10^3 = 147.01 \text{ KN.m} \quad (5.9.d)$$

Como não há rotura por flexão, faz-se a verificação da rotura por esforço transversal. Sabendo a altura do ponto de referência para o cálculo de temperatura do estribo, pode-se facilmente retirar a temperatura do estribo nesse ponto e calcular o fator de redução do aço do estribo a utilizar na Equação 5.10 para verificar a segurança ao esforço transversal no tempo de análise definido.

Na Figura 5.4 pode-se verificar que a temperatura do estribo a altura  $h_{ef} = 0,075$ , é de  $558,6^{\circ}\text{C}$ , assim sendo pode-se obter o fator de redução do estribo e a respetiva tensão de cedência do aço de estribo, conforme apresentado na Equação 5.10.

$$k_{s,e}(\theta) = 0.78 - (\theta - 500) \times ((0.78 - 0.47) / (600 - 500)) = 0.598$$

$$f_{yd,fi,e} = k_s(\theta) \times f_{yd} = 299,17 \text{ MPa} \quad (5.10)$$

Na Equação 5.11 é calculada o esforço transversal resistente na secção submetida a 56 minutos de Incêndio Padrão. A área de armadura de esforço transversal a utilizar é a área que resiste às ações à temperatura ambiente calculada anteriormente, pois ela não altera.

$$V_{Rds,fi} = \frac{A_{sw}}{S} \times z \times f_{ywd} \times \cot \theta = 3,34 \times 10^{-4} \times 0,9 \times 0,57 \times 299,17 \times 2,5 = 128,15 \text{ KN} \quad (5.11)$$

De acordo com o resultado acima apresentado, verifica-se que a partir dos 56 minutos a secção perde a capacidade para resistir à ação atuante em situação de incêndio. Esta diminuição da capacidade é provocada pela gradual redução da tensão de cedência do aço de armadura de esforço transversal. Por isso a secção analisada resiste durante 55 minutos de Incêndio Padrão, sendo que logo no minuto seguinte ocorre a rotura por esgotamento da capacidade resistente do estribo.

Para certificar que a rotura é de fato por esgotamento da capacidade resistente do estribo, a seguir é calculado o esforço transversal resistente máximo a partir da qual ocorre a rotura por esmagamento da escora comprimida do betão.

$$V_{Rd,max,fi} = \frac{\alpha_{cw,fi} \times b_w \times z \times v_1 \times f_{cd,fi}}{(\cot \theta + \tan \theta)}$$

$$V_{Rd,max,fi} = \frac{1 \times 0,2429 \times 0,9 \times 0,57 \times 0,54 \times 25 \times 10^3}{\left( \cot \theta + \frac{1}{\cot \theta} \right)} = 580,07 \text{ KN} \quad (5.12)$$

Portanto o valor é bastante superior ao esforço atuante, garantindo assim o não esmagamento do betão para a ação atuante em situação de incêndio. Ao comparar o valor obtido em situação de incêndio e obtido à temperatura ambiente, verifica-se que o primeiro é relativamente maior. Tal fato acontece porque em situação de incêndio não se reduz a resistência à compressão do betão pelo coeficiente de segurança de valor 1.5, utilizado à temperatura ambiente, e a geometria reduzida resultante da aplicação do método não tem uma influência muito significativa na redução do  $V_{Rdmax,fi}$ .

#### b) Análise pelo Método das Zonas

Para o Método das Zonas é analisada a mesma secção, com a mesma duração de exposição ao Incêndio Padrão e solicitada pelas mesmas ações que no Método da Isotérmica dos  $500^{\circ}\text{C}$ .



Ao utilizar Método das Zonas também é necessário calcular a geometria da secção reduzida, que é calculada a partir da determinação da largura da zona danificada, utilizando a Equação 2.25 após dividir a secção em, pelo menos, 3 zonas.

Para o exemplo dividiu-se a secção em 3 zonas de igual largura, com 10 cm cada, os quais é determinado a temperatura no centro das mesmas e a meia altura da secção transversal, como mostra a Figura 5.5.

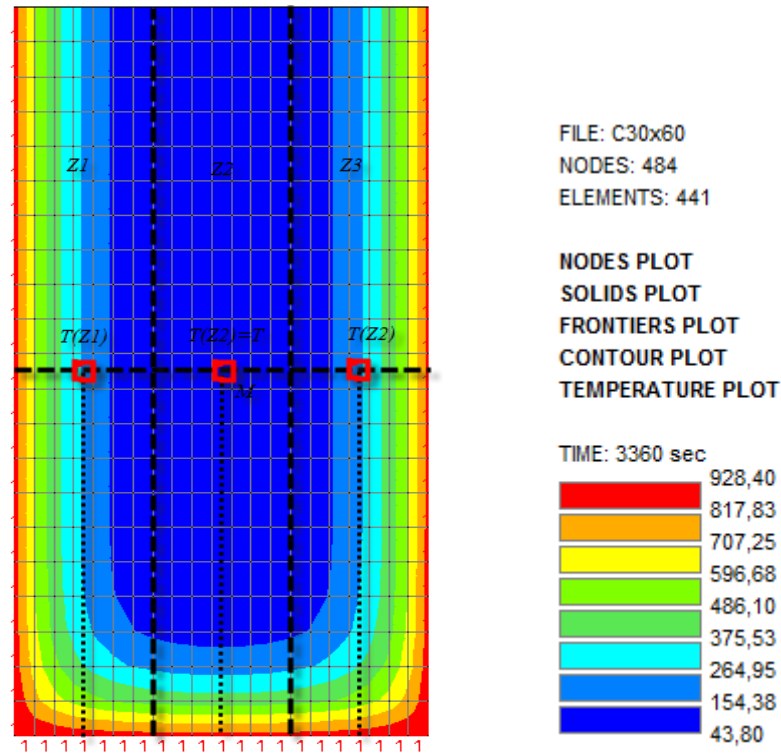


Figura 5.5: Fator de redução do betão determinado a meia altura da secção

De acordo com a temperatura em cada uma das zonas os fatores de redução do betão à compressão (betão com agregados siliciosos) são calculados de acordo com a Tabela 2.1, e são apresentados na Expressão 5.13 a seguir. Para o exemplo em estudo, as temperaturas nas zonas 1 e 3 são iguais e o fator de redução também é igual, o mesmo acontece para a zona 2 e o ponto  $M$  da secção.

$$\theta(M) = \theta(Z_2) = 43,8^\circ C$$

$$\theta(Z_1) = \theta(Z_3) = 247,6^\circ C \quad (5.13)$$

$$k_c(\theta_M) = k_c(Z_2) = 1,0$$

$$k_c(Z_1) = k_c(Z_3) = 0,95 - (\theta_M - 200) \times ((0,95 - 0,85) / (300 - 200)) = 0,902$$

Tendo os fatores de redução de cada zona e do ponto médio, prossegue-se ao cálculo do fator de redução médio, para ter em conta a variação de temperatura em cada zona considerada.

$$k_{c,m} = \frac{\left(1 - \frac{0,2}{n}\right)}{n} \times \sum_{i=1}^n k_c(\theta_i) = \frac{(1 - (0,2 \div 3))}{3} \times (0,902 + 1 + 0,902) = 0,873 \quad (5.14)$$

E a largura da zona danificada é de:

$$a_z = w \times \left[1 - \frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)}\right] = (0,3 \div 2) \times \left[1 - \frac{0,873}{1}\right] = 0,0191m \quad (5.15)$$

Após determinar a largura da zona danificada  $a_z$ , a secção reduzida é de  $26,19 \times 58,10 \text{ cm}^2$ . No Método das Zonas a resistência residual do betão à compressão é reduzida aplicando o fator de redução do betão no ponto médio  $k_c(\theta_M)$  que para o caso é unitário, por isso a resistência residual do betão à compressão mantém-se nos 25MPa.

A redução de resistência de cálculo do aço nos estribos é calculada da mesma forma que para o Método da Isotérmica dos 500°C, mas tendo em conta que a secção reduzida é diferente para os dois métodos.

A altura do ponto de referência será dada da mesma forma que no método anterior e será:

$$h_{c,ef} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{2,5 \times (h - d)}{(h - x)} \\ \frac{h}{2} \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{2,5 \times (0,60 - 0,57)}{(0,60 - x)} \\ \frac{0,60}{2} \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,075}{(0,60 - x)} \\ 0,30 \end{array} \right\} \quad (5.8.1.a)$$

A altura do eixo neutro difere do Método da Isotérmica por causa da diferença nas larguras restantes da secção já que as áreas de armadura são as mesmas e o fator de redução do aço na armadura longitudinal mantém-se.

$$x = \frac{As \times f_{yd,fi}}{f_{cd,fi} \times 0,8 \times b} = \frac{14,81 \times 10^{-4} \times 299,17}{25 \times 0,8 \times 0,2619} = 0,085 \quad (5.9.1.c)$$

Tendo em conta a localização do eixo neutro a altura  $h_{ef}$  é de:

$$h_{c,ef} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,075}{(0,60 - 0,085)} \\ 0,30 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,075 \\ 0,172 \end{array} \right\} = 0,075 \quad (5.8.1.b)$$

Apesar da alteração do eixo neutro a altura do ponto de referência mantém-se, por ser mais condicionada pela primeira condição da Equação 5.8, por isso a temperatura nesse ponto

também é o mesmo que no método anterior (558,6°C), e o fator de redução do aço do estribo também é igual,  $k_{s,e}(\theta) = 0,598$ , daí tira-se as mesmas conclusões que no método anterior, ou seja há uma rotura por esgotamento da capacidade resistente ao esforço transversal atuante em situação de incêndio.

A verificação ao esmagamento do betão é feita da mesma forma que para o método anterior, utilizando a geometria reduzida obtida e a redução da resistência à compressão do betão durante o tempo de análise. A seguir é apresentada o resultado obtido.

$$V_{Rd,max,fi} = \frac{\alpha_{cw,fi} \times b_w \times z \times v_1 \times f_{cd,fi}}{(\cot \theta + \tan \theta)}$$

$$V_{Rd,max,fi} = \frac{1 \times 0,2619 \times 0,9 \times 0,57 \times 0,54 \times 25 \times 10^3}{\left( \cot \theta + \frac{1}{\cot \theta} \right)} = 625,44 \text{ KN} \quad (5.12.a)$$

Tal como no Método da Isotérmica dos 500°C no cálculo da resistência ao esmagamento do betão verifica-se que há um aumento deste parâmetro. As razões deste aumento são as mesmas que para o método anterior, mas no Método das Zonas tanto há uma redução da geometria da secção como da resistência à compressão do betão.

No caso do exemplo a redução da geometria é baixa e a resistência à compressão do betão não se alterou para o tempo de análise porque, no ponto escolhido para determinar as temperaturas e o respetivo fator de redução da resistência à compressão do betão (ponto *M*), as temperaturas são relativamente baixas, ainda menor do que 100°C.

O EC2-1-2 não dá indicações claras relativamente a localização (em altura) dos pontos na secção onde se determinam as temperaturas a serem usadas no cálculo do fator de redução da resistência à compressão do betão. Como o mesmo código dá indicações do ponto para avaliação de temperatura do estribo, fez-se, nesse trabalho, a avaliação da resistência ao esmagamento do betão nessa mesma altura ( $h_{ef}$ )

A variação na localização desses pontos tem pouca influência nas resistências ao momento fletor e ao esforço transversal, mas, como apresentado a seguir, tem alguma influência na resistência ao esmagamento do betão, provocando uma ligeira diminuição da mesma.

Na Figura 5.6 é apresentada a secção transversal, dividida em três zonas, em que os fatores de redução, em cada uma dessas zonas e no ponto médio (*M*), foram obtidos de acordo com a temperatura a uma altura  $h_{ef}$ .

As temperaturas nos pontos a nível da altura  $h_{ef}$  são maiores, logo há uma maior redução tanto geometria da secção como da resistência à compressão do betão, provocando assim uma diminuição da resistência máxima ao esmagamento do betão.

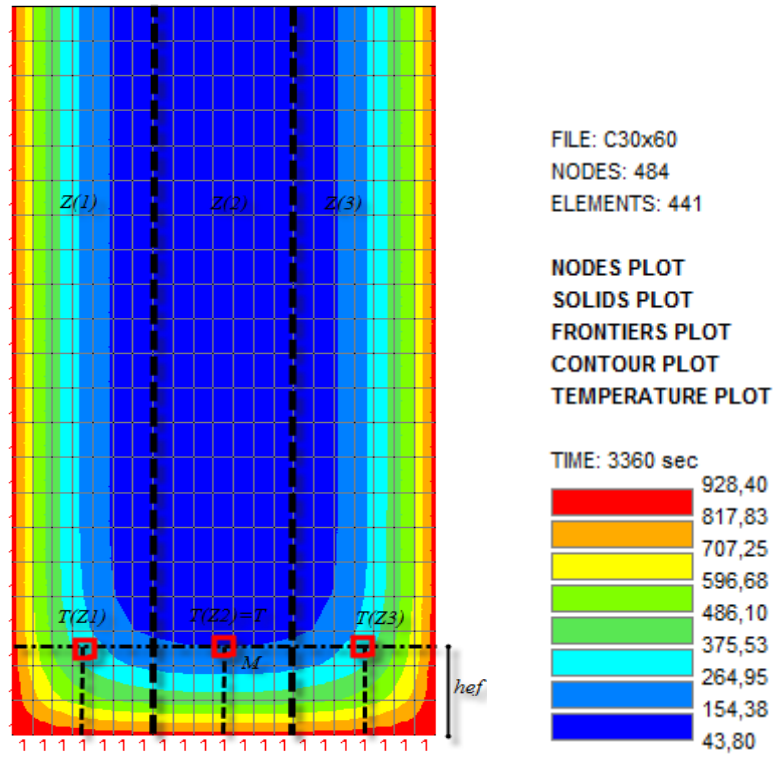


Figura 5.6: Fator de redução do betão calculado a altura  $h_{ef}$

As temperaturas obtidas nos pontos indicados na Figura a cima são as seguintes:

$$\theta(M) = \theta(Z_2) = 158,5^\circ C$$

$$\theta(Z_1) = \theta(Z_3) = 335,1^\circ C$$

$$k_c(\theta_M) = k_c(Z_2) = 1,00 - (\theta_M - 100) \times ((1,00 - 0,95) / (200 - 100)) = 0,971 \quad (5.13.a))$$

$$k_c(Z_1) = k_c(Z_3) = 0,85 - (\theta_M - 300) \times ((0,85 - 0,75) / (400 - 300)) = 0,815$$

O fator de redução médio vem dado por:

$$k_{c,m} = \frac{\left(1 - \frac{0,2}{n}\right)}{n} \times \sum_{i=1}^n k_c(\theta_i) = \frac{(1 - (0,2 \div 3))}{3} \times (0,815 + 0,971 + 0,815) = 0,809 \quad (5.14.a))$$

De acordo com os dados obtidos a largura da zona danificada vem dada por:

$$a_z = w \times \left[1 - \frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)}\right] = (0,3 \div 2) \times \left[1 - \frac{0,809}{0,971}\right] = 0,02503m \quad (5.15.a))$$

Com a largura da zona danificada de 25,03 mm, a geometria reduzida é de 24,99x57,50 cm<sup>2</sup>. Os passos seguintes são os mesmos que do caso anterior. Ao prosseguir com os cálculos chega-se a altura de eixo neutro de 0,087 m, mantendo a altura efetiva em 0,075m.

Como indicado a cima, os valores do esforço transversal e momento fletor resistentes em situação de incêndio mantem-se.

Pode-se constatar na Equação 5.12.b) que resistência máxima da secção, com a nova localização dos pontos de avaliação de temperatura reduz.

$$V_{Rd,max,fi} = \frac{\alpha_{cw,fi} \times b_w \times z \times v_1 \times f_{cd,fi}}{(\cot \theta + \tan \theta)}$$

$$V_{Rd,max,fi} = \frac{1 \times 0,2499 \times 0,9 \times 0,57 \times 0,54 \times 0,971 \times 25 \times 10^3}{\left( \cot \theta + \frac{1}{\cot \theta} \right)} = 579,48 \text{ KN} \quad (5.12.a)$$

c) Análise através da aplicação desenvolvida

Será analisada a mesma secção analisada anteriormente e solicitada pelas mesmas ações que foram utilizadas no exemplo manual. A análise térmica e mecânica terão uma duração de 60 minutos

Na Figura 5.7 é apresentada a interface gráfica do programa com os dados introduzidos. Estes dados foram obtidos da análise a frio, feita anteriormente.

De acordo com o dimensionamento a frio feita anteriormente, a área de armadura de esforço transversal é de  $3.34 \text{ cm}^2$  e na aplicação utilizou-se dois ramos de estribos, com varões de diâmetro 6 mm e afastamento de 17,1 cm. Para a armadura de tração a área obtida foi de  $14,81 \text{ cm}^2$  e foi utilizado cinco varões de diâmetro 20 mm, correspondentes a uma área de  $15,71 \text{ cm}^2$

**FEUP - Mestrado Integrado em Engenharia Civil 2012-2013**

**Comportamento ao corte de elementos de Betão Armado em Situação de Incêndio**

**Esforço Transverso**

<b>Características da secção</b> b (m) <input type="text" value="0.3"/> h (m) <input type="text" value="0.6"/> rec. (cm) <input type="text" value="3"/>	<b>Características dos materiais</b> fck (Mpa) <input type="text" value="25"/> fyk (Mpa) <input type="text" value="500"/> Tempo de Análise Mecânica (min) <input type="text" value="60"/>	<b>Análise Térmica</b> Nº Colunas <input type="text" value="21"/> Nº Linhas <input type="text" value="21"/> <input type="button" value="Gerar Ficheiro .in"/> <input type="button" value="Run SAFIR"/> Faces expostas ao fogo (I. P.) <input type="checkbox"/> Face Superior <input checked="" type="checkbox"/> Face Esquerda <input checked="" type="checkbox"/> Face Direita <input checked="" type="checkbox"/> Face Inferior Tempo de Análise Térmica (min) <input type="text" value="60"/>
<b>Esforços em situação de incêndio</b> Med.t (KN.m) <input type="text" value="128.1"/> Ved.t (KN) <input type="text" value="130.3"/> Ned.t (KN) <input type="text" value="0"/>	<b>Armaduras de esforço transversal</b> Diâmetro do estribo (mm) <input type="text" value="6"/> Espaçamento do estribo (m) <input type="text" value="0.171"/> Ângulo alfa (°C) <input type="text" value="90"/>	<b>Armaduras de tração</b> <input checked="" type="radio"/> Único Diâmetro <input type="radio"/> Dois diâmetros Único diâmetro Nº <input type="text" value="5"/> D (mm) <input type="text" value="20"/> Dois diâmetros Nº-1 <input type="text" value="0"/> Nº-2 <input type="text" value="0"/> D-1 (mm) <input type="text" value="0"/> D-2 (mm) <input type="text" value="0"/>
<b>Método de cálculo</b> <input checked="" type="radio"/> Método da Isoterma dos 500°C <input type="radio"/> Método das zonas	<b>Resultado</b> <input type="button" value="Analisar"/> <input type="button" value="Ajuda"/> A secção analisada resiste durante <input type="text" value="55"/> minutos de fogo (IP)	<b>Resultado</b> Mrd.t (KN.m) <input type="text" value="161.518"/> Vrd.t (KN) <input type="text" value="130.695"/> A.E (fi) <input type="text" value="21.8014"/>

Aluno: Adriano Baptista Gonçalves      Orientador: Professor Doutor Rui Faria

Figura 5.7: Exemplo de utilização da Aplicação desenvolvida para o esforço transversal

Após a introdução de dados é feita a análise da secção em situação de incêndio pelos dois métodos simplificados descritos anteriormente.

O primeiro exemplo foi feito utilizando o Método da Isotérmica dos 500°C, sendo que a secção analisada resiste durante 55 minutos de Incêndio Padrão, atingindo a rotura por esgotamento da capacidade resistente das armaduras de esforço transverso.

Na Tabela 5.1 é apresentada os resultados obtidos ao longo do tempo, onde pode-se verificar a progressiva diminuição da geometria reduzida da secção, do momento fletor resistente, do esforço transverso resistente e do esforço transverso máximo que garante o não esmagamento do betão.

Fazendo uma análise à Tabela 5.1 verifica-se que até aos 14 minutos não se regista qualquer alteração relativamente a redução da geometria da secção, pois até esse instante a temperatura na secção ainda não atinge os 500°C. A partir desse período algumas zonas da secção começam a atingir uma temperatura superior aos 500°C, começando assim a redução da geometria da secção. A secção transversal sofre redução a cada ciclo de 11 a 14 minutos, que é o ciclo que demora para que a temperatura atinja valores superiores a 500°C.

À medida que o tempo de análise aumenta, aumenta a temperatura e diminui os esforços resistentes. O momento fletor e o esforço transverso começam a diminuir a partir dos 16 minutos. A partir deste instante os efeitos de temperatura na redução das propriedades de resistência da armadura do esforço transverso e longitudinal começam a ser mais agravosos causando a redução dos valores do esforço transverso e momento fletor. Essa redução prossegue até ao tempo máximo de resistência da secção.

O esforço transverso máximo que pode ser aplicado na secção só começa a diminuir a partir dos 22 minutos da duração da análise. Esse parâmetro é influenciado pelo ângulo da escora comprimida, que no caso mantém-se constante, pela resistência à compressão do betão, que para o Método da Isotérmica mantém-se inalterável, e pela largura da secção, que começa a diminuir justamente a partir do mesmo instante de tempo.

Tabela 5.1: Resultados do Exemplo A.1 pelo Método da Isotérmica dos 500°C

$T(\text{min})$	$b(m)$	$h(m)$	$M_{Rd,fi}(KN.m)$	$V_{Rds,fi}(KN)$	$V_{Rdmax,fi}(KN)$
1	0,3000	0,6000	402,9093	212,0575	716,4310
14	0,3000	0,6000	402,9093	212,0575	716,4310
15	0,3000	0,5714	402,9093	212,0575	716,4310
28	0,2714	0,5714	401,0478	212,0575	648,1995
29	0,2714	0,5714	390,4997	212,0575	648,1995
30	0,2714	0,5714	380,2174	212,0575	648,1995
35	0,2714	0,5714	333,5927	208,0920	648,1995
40	0,2714	0,5429	284,9173	188,358	648,1995
47	0,2429	0,5429	217,5952	163,8271	579,9680
55	0,2429	0,5429	161,5183	130,6953	579,9680
56	0,2429	0,5429	155,9098	126,8825	579,9680

Na análise pelo Método das Zonas, os valores do esforço transversal e do momento fletor começam a alterar a partir do mesmo instante que para o Método da Isotérmica dos 500°C, porque tanto num como no outro método estes parâmetros dependem da redução da resistência do aço de armadura de esforço transversal e de tração, que começam a alterar a partir dos 16 minutos, independentemente do método utilizado para a análise.

A redução da geometria da secção e do fator da resistência à compressão do betão, e consequentemente do esforço transversal máximo para o Método das Zonas depende da localização, em altura, dos pontos onde se retiram as temperaturas utilizadas para o cálculo do fator de redução médio e do fator de redução do ponto  $M$ .

Assim como no exemplo manual feito a cima, no exemplo utilizando a aplicação desenvolvida foi avaliado o fator de redução do betão a meio das zonas divididas e a dois níveis diferentes.

No primeiro caso, os pontos para retirar as temperaturas localizam-se ao meio da secção, em altura, como apresentado na Figura 5.5 quer para retirar a temperatura no centro de cada zona como para retirar a temperatura no ponto  $M$ .

A segunda opção foi calcular os fatores de redução médio e do ponto  $M$  a altura  $h_{ef}$  apresentado na Figura 5.6) de modo a fazer uma avaliação da rotura do betão a esse nível.

Na Tabela 5.2 é apresentada os resultados obtidos ao utilizar a primeira opção e na Tabela 5.3 os resultados da segunda opção.

O fator de redução do betão no ponto  $M$ , apresentado na Tabela 5.2, é unitário durante todo o tempo de análise. Tal deve-se ao fato deste ponto situar no centro da secção que dificilmente é afetada por aumentos significativos de temperatura, pelo fato do betão ser um mau condutor térmico (comparativamente ao aço).

O que sucede com o fator de redução no ponto  $M$  não acontece com o fator de redução médio. Este, como leva em conta a temperatura no centro das três zonas consideradas e no ponto  $M$ , sofre alterações cada vez maiores quando maior for a diferença de temperatura entre essas três zonas consideradas e o Ponto  $M$ . Nos primeiros 25 minutos, (Tabela 5.2) a redução sofre ligeiras alterações, a partir desse instante as diferenças de temperatura na secção começam a aumentar e o fator de redução médio acompanha esse aumento.

No Método das Zonas a geometria da zona danificada depende, principalmente da diferença entre o fator de redução médio e do fator de redução no ponto  $M$ , que são utilizados no cálculo da largura da zona danificada e que por sua vez é utilizada para determinar a geometria reduzida.

No exemplo em análise o fator de redução do ponto  $M$  é constante e de valor unitário, logo quando menor for o fator de redução médio maior será a redução da secção transversal, na Tabela 5.2.

A redução secção transversal tem pouca influência na resistência ao esforço transversal e ao momento fletor resistentes. Quando comparado os valores desses parâmetros nas Tabelas 5.1 e 5.2 nota-se que, para os mesmos instantes e como era previsível, os valores do momento fletor e esforço transversal resistentes são iguais.

Se para o esforço transversal e momento fletor resistentes a geometria reduzida tem pouca influência, tal não sucede com o esforço transversal resistente máximo. Quando maior for a redução da geometria da secção menor é o esforço transversal resistente máximo.

Na Tabela 5.2 pode se ver que, a partir dos 25 minutos a redução da secção transversal é maior e o esforço transversal máximo começa a diminuir.

A redução da resistência à compressão do betão, que influencia a resistência ao esmagamento do betão, não alterou nesse exemplo porque o fator de redução no ponto  $M$  utilizado para efeitos de redução desse parâmetro permaneceu constante.

Tabela 5.2: Resultados do Exemplo A.1 pelo Método da Zonas com  $k_c(\theta)$  a  $H/2$

$T(\text{min})$	$FRB_m$ (medio)	$FRB_M$ ( $P^{to} M$ )	$b(m)$	$h(m)$	$M_{Rd,fi}(KN.m)$	$V_{Rds,fi}(KN)$	$V_{Rdmax,fi}(KN)$
1	0,9333	1,0000	0,2800	0,5900	402,9093	212,0575	668,6690
24	0,9333	1,0000	0,2800	0,5900	402,9093	212,0575	668,6690
25	0,9331	1,0000	0,2799	0,5900	402,9093	212,0575	668,5352
26	0,9316	1,0000	0,2795	0,5897	402,9093	212,0575	667,4208
28	0,9283	1,0000	0,2785	0,5892	401,0478	212,0575	665,0804
35	0,9174	1,0000	0,2752	0,5876	333,5927	208,0920	657,2570
36	0,9143	1,0000	0,2743	0,5871	316,8398	199,9278	656,1203
40	0,9097	1,0000	0,2729	0,5865	284,9173	188,3580	651,7516
47	0,8966	1,0000	0,2690	0,5845	217,5952	163,8271	642,3234
55	0,8752	1,0000	0,2625	0,5813	161,5183	130,6953	626,9886
56	0,8726	1,0000	0,2618	0,5809	155,9098	126,8825	625,1609

O fator de redução com o ponto  $M$  situado a uma altura  $h_{ef}$ , começa a reduzir nos 41 minutos de exposição ao Incêndio Padrão. A temperatura na secção em situação de incêndio aumenta das faces expostas ao fogo para o centro da secção transversal. Na zona mais próxima da face a resistência à compressão do betão é menor, já que a temperatura é maior, o que é traduzido pela diminuição do valor do fator de redução utilizado na afetação da resistência à compressão do betão em situação de incêndio.

O fator de redução médio obtido quando é utilizado a segunda opção acima indicada apresenta, para cada instante de tempo, valores menores do que os apresentados na Tabela 5.2. Esses valores são menores pelo fato das temperaturas nas zonas serem maiores e de temperatura no ponto  $M$  também ser menor.

A secção transversal analisada, com base nos fatores de redução da Tabela 5.3, sofre uma menor redução, o que contribui para a diminuição da resistência ao esmagamento das escoras comprimidas de betão. Essa diminuição é também afetada pelo fator de redução do betão no ponto  $M$ , que já deixa de ser unitário como no caso anterior.



Tabela 5.3: Resultados da análise feita pelo Método da Zonas com  $k_c(\theta)$  a  $h_{ef}$

$T( min)$	$FRB_m$ (medio)	$FRB_M$ ( $P^{to} M$ )	$b( m)$	$h( m)$	$M_{Rd,fi}(KN.m)$	$V_{Rds,fi}(KN)$	$V_{Rdmax,fi}(KN)$
1	0,9333	1,0000	0,2800	0,5900	402,9093	212,0575	668,6690
22	0,9333	1,0000	0,2800	0,5900	402,9093	212,0575	668,6690
23	0,9319	1,0000	0,2796	0,5898	402,9093	212,0575	667,6437
26	0,9254	1,0000	0,2776	0,5888	402,9093	212,0575	662,9853
28	0,9209	1,0000	0,2763	0,5881	401,0478	212,0575	659,7757
35	0,9044	1,0000	0,2713	0,5857	333,5927	208,0920	647,9402
36	0,9019	1,0000	0,2706	0,5853	316,8398	199,9278	646,1571
40	0,8833	1,0000	0,2650	0,5825	284,9173	188,3580	632,8283
41	0,8783	0,9982	0,2639	0,5820	274,5504	184,6724	629,2286
55	0,8132	0,9725	0,2625	0,5813	161,5183	130,6953	582,6113
56	0,8091	0,9708	0,2500	0,5750	155,9098	126,8825	579,6357

### 5.2.2. EXEMPLO A.2: ROTURA CONDICIONADA PELO ESMAGAMENTO DAS ESCORAS COMPRIMIDAS DE BETÃO

A secção transversal analisada é uma secção em T cujas características encontram-se apresentadas na Figura 5.8.c), o recobrimento das armaduras é de 5 cm. A viga apresenta um vão de 6 metros é simplesmente apoiada e as solicitações atuantes à temperatura ambiente e em situação de incêndio são de 120,00 e 84  $KN/m^2$  respetivamente. Tal como no Exemplo A.1 admite-se que não existe esforço Normal. Será utilizada um betão B20/25 e aço A500NR.

Para o exemplo A.2 será feita os mesmos procedimentos feitos no exemplo A.1, começa-se por fazer uma análise da secção à temperatura ambiente seguido da análise em situação de incêndio.

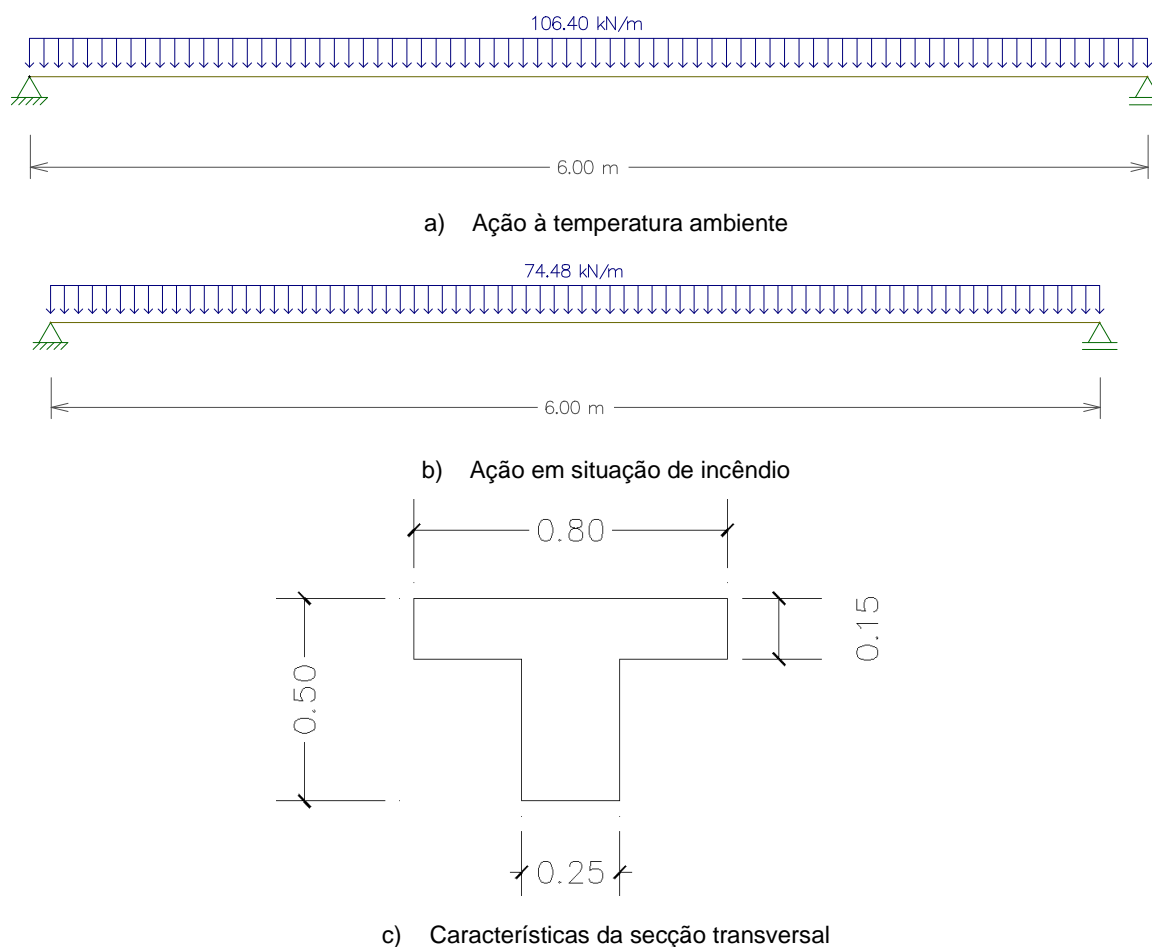


Figura 5.8 Ações e Geometria da secção transversal a utilizar no Exemplo A.2

#### 5.2.2.1. Cálculo à temperatura ambiente

Como os procedimentos para o cálculo apresentados no Exemplo A.1 continuam a ser válidos para o Exemplo A.2, apresenta-se os resultados do cálculo, fazendo referencia as Equações utilizadas para o efeito.

Para fazer a verificação ao esforço transversal é necessário verificar a necessidade de armadura de esforço transversal e determiná-lo. Os parâmetros necessários são apresentados a seguir:

$$C_{Rd,c} = 0,12, \text{ para } \gamma_C = 1,5, k = 1.667 < 2,0, \rho_1 = \frac{A_{sl}}{b_w \times d} \leq 0,02$$

A percentagem mecânica da armadura para a secção do Exemplo A.2 é obtida de acordo com o valor de momento fletor calculada com base na solicitação atuante à temperatura ambiente, apresentado na Figura 5.8.a)

$$\mu = \frac{M_{Rd}}{b_w d^2 f_{cd}} = \frac{478,80}{0,80 \times 0,45^2 \times 13,333 \times 10^3} = 0,22$$

De acordo com o ábaco apresentado em [21]  $\omega = 0,253$  e a área de armadura  $A_{sl}$  será:

$$A_{sl} = b_w d \omega \frac{f_{cd}}{f_{syd}} = 27,93 \text{ cm}^2 \quad \text{logo} \quad \rho = 7,76 \times 10^{-3} \leq 0,02$$

$$x = d \times \alpha = 0,45 \times 0,312 = 0,14$$

O valor do esforço transversal resistente, caso não seja necessário armadura de esforço transversal é:

$$V_{Rd,c} = \left[ C_{Rd,c} \times k \times (100 \times \rho_1 \times f_{ck})^{1/3} + k_1 \times \sigma_{cp} \right] \times b_w \times d = 77,74 \text{ kN} , \quad \text{Com} \quad \text{o}$$

mínimo de:  $V_{Rd,c \min} = (v_{\min} + k_1 \times \sigma_{cp}) \times b_w \times d = 34,84 \text{ kN}$

Logo  $V_{Rd,c} = 77,74 \text{ kN} < 319,2 \text{ kN}$ , portanto é necessário armadura de esforço transversal.

Para calcular a área de armadura de esforço transversal que é necessária pode-se utilizar a Equação 5.6, para isso determina-se a seguir o ângulo da escora comprimida igualando a Equação 5.6 ao esforço transversal atuante.

$$V_{Rd, \max} = \frac{\alpha_{cw} \times b_w \times z \times v_1 \times f_{cd}}{(\cot \theta + \tan \theta)} = 186,2$$

$$\Leftrightarrow 319,2 = \frac{1 \times 0,25 \times 0,9 \times 0,45 \times 0,552 \times 13,333 \times 10^3}{\left( \cot \theta + \frac{1}{\cot \theta} \right)}$$

$$\Leftrightarrow 319,2 \cot^2 \theta - 745,18 \cot \theta + 319,2 = 0 \Leftrightarrow \cot \theta = 1,769 \cup \cot \theta = 0,565$$

Ao resolver a Equação em função do  $\cot \theta$  obtém-se dois valores de  $\cot \theta$  sendo que um deles está no intervalo estipulado no EC2-1-1, por isso admite-se  $\cot \theta = 1,769$ . A área de armadura de esforço transversal necessária para garantir a segurança de acordo com o ângulo calculado está apresentada na Equação 5.6.a)

$$\left( \frac{A_{sw}}{S} \right)_{\min} = \frac{0,08 \sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \times b = 1,789 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

$$\frac{A_{sw}}{S} = \frac{V_{Rd,s}}{z \times f_{ywd} \times \cot \theta} = 1,025 \text{ cm}^2 / \text{m} < \left( \frac{A_{sw}}{S} \right)_{\min} \quad \text{logo} \quad \frac{A_{sw}}{S} = 1,789 \text{ cm}^2 / \text{m} \quad (5.6.a))$$

O ângulo da inclinação das escoras de betão obtido é de 29,07 °C. Ao utilizar um valor inferior a este ocorre o esmagamento do betão. Como exemplo foi utilizado na Equação a baixo o valor mínimo do ângulo previsto no EC2-1-1 a quantidade de armadura de esforço transversal aumentaria consideravelmente e o esforço transversal resistente máximo diminui, o que causa rotura por esmagamento da escora de betão.

$$V_{Rd,max} = 256,96KN, \frac{A_{sw}}{S} = 7,25cm^2 / m \quad (5.6.b))$$

#### 5.2.2.2. Cálculo em situação de incêndio

Em situação de incêndio é mais difícil existir rotura por esmagamento do betão do que rotura por esgotamento da capacidade resistente das armaduras de esforço transverso.

A pouca possibilidade de ocorrência do esmagamento do betão pode ser justificada por duas razões. A primeira tem a ver com a redução da ação a ser utilizada em situação de incêndio. Ao fazer essa redução, de acordo com valores propostos pelo EC2-1-1, reduz-se o esforço transverso atuante em situação de incêndio e o esforço transverso resistente correspondente mantem-se em valores elevados e vai diminuindo à medida que o tempo de análise e a temperatura aumentam.

Quando o tempo de análise aumenta provoca o aumento de temperatura e o fator de redução do aço da armadura de esforço transverso aumenta. Esse aumento é mais acelerado quando comparado com o fator de redução do betão no ponto *M* da secção (em qualquer dos pontos escolhidos nesse trabalho no caso do Método das Zonas) e a redução da geometria da secção.

Como não ocorre a rotura por esmagamento do betão, para o exemplo estudado, mas sim pelo esgotamento da capacidade resistente das armaduras de esforço transverso, o cálculo manual segue os mesmos passos que para o Exemplo A.1, por isso nesse Exemplo apresentado o resultado obtido com a utilização da aplicação computacional desenvolvida.

A área de armadura de momento fletor utilizada para a análise é de  $29,45 \text{ cm}^2$  correspondentes a  $5\phi 25$  e a área de armadura transversal é de  $8,05 \text{ cm}^2$  correspondentes a  $2\phi 8 // 0,125$ . O tempo de análise mecânica e térmica é de 90 minutos.

Do início da análise até uma duração de 52 minutos, no Método da Isotérmica e até 44 e 49 pelo pela primeira e segunda opção do Método da Zonas aqui apresentados (Tabelas 5.8 e 5.9 respetivamente), a capacidade resistente ao esmagamento do betão é menor do que a resistência conferida pelas armaduras de esforço transverso. A partir desses períodos de tempo invertem-se os papéis, a resistência ao esforço transverso conferidas pelas armaduras passa a ser inferior a capacidade resistente ao esmagamento do betão. Como com o avançar do tempo de análise ao fogo a temperatura aumenta as resistências vão diminuindo, mas a secção acaba por romper por esgotamento da capacidade resistente dos estribos, já que a redução da capacidade resistente deste é mais acelerada.

Na Tabela 5.4 é apresentada os valores do esforço transverso resistente e as reduções da geometria da secção transversal em análise. Tal como no Exemplo A.1 a redução da secção começa entre os 11 e os 14 minutos de incêndio, tempo que a temperatura demora para atingir os  $500^\circ\text{C}$ .

A rotura da secção ocorre por esgotamento da capacidade resistente das armaduras de esforço transverso após 63 minutos de Incêndio Padrão.

Tabela 5.4: Resultados do Exemplo A.2 pelo Método da Isotérmica dos 500°C

$T( min)$	$b( m)$	$h( m)$	$V_{Rds,fi}(KN)$	$V_{Rdmax,fi}(KN)$
1	0.2500	0.5000	407.1504	385.4483
14	0.2500	0.4762	407.1504	385.4483
20	0.2262	0.4762	407.1504	348.7389
32	0.2262	0.4524	407.1504	348.7389
39	0.2024	0.4524	399.7158	312.0296
42	0.2024	0.4524	377.0538	312.0296
52	0.2024	0.4286	308.7422	312.0296
56	0.2024	0.4286	276.6831	312.0296
62	0.2024	0.4286	232.7597	312.0296
63	0.2024	0.4286	225.9440	312.0296
64	0.2024	0.4286	219.1283	312.0296

Quando é utilizado o Método das Zonas para a análise, logo no primeiro minuto de análise há uma pequena redução da secção transversal, no entanto a redução é menos acentuada do que no Método da Isotérmica dos 500°C.

Tabela 5.5: Resultados do Exemplo A.2 pelo Método da Zonas com  $k_c(\theta)$  a  $H/2$

$T( min)$	$b( m)$	$h( m)$	$V_{Rds,fi}(KN)$	$V_{Rdmax,fi}(KN)$
1	0.2333	0.4917	407.1504	359.7517
20	0.2331	0.4916	407.1504	359.4519
25	0.2306	0.4903	407.1504	355.6026
35	0.2258	0.4879	407.1504	348.0838
44	0.2182	0.4841	362.7222	336.3679
49	0.2142	0.4821	329.5801	330.2281
50	0.2134	0.4817	323.3996	329.0769
55	0.2099	0.4799	284.5086	323.5607
60	0.2065	0.4766	246.8960	318.3563
63	0.2046	0.4773	225.9440	315.4063
64	0.2039	0.4770	219.1283	314.4470

Ao utilizar o Método das Zonas e quando utilizou-se os fatores de redução médio e do ponto  $M$  a uma altura  $h_{ef}$ , a redução a geometria da secção e as resistências ao esforço transversal da secção são cada vez menores à medida que o tempo aumenta, pois a temperatura também aumenta.

Quando é feita a análise pelo Método das Zonas a secção atinge um tempo de resistência máxima de 64 minutos e rompe pelo esgotamento da capacidade resistente das armaduras de esforço transversal.

Tabela 5.6: Resultados do Exemplo A.2 pelo Método das Zonas com  $k_c(\theta)$  a  $h_{ef}$

$T (min)$	$b (m)$	$h (m)$	$V_{Rds,fi}(KN)$	$V_{Rdmax,fi}(KN)$
1	0.2333	0.4917	407.1504	359.7517
20	0.2331	0.4915	407.1504	359.3800
25	0.2305	0.4903	407.1504	355.4227
35	0.2251	0.4875	407.1504	347.0165
42	0.2181	0.4841	377.0538	336.3199
49	0.2116	0.4808	329.5801	326.3188
50	0.2108	0.4804	323.3996	324.9757
55	0.2065	0.4783	284.5086	318.4282
60	0.2033	0.4766	246.8960	311.5330
63	0.2015	0.4758	225.9440	307.5158
64	0.2009	0.4755	219.1283	306.1907

Ao fazer uma análise ao Exemplo A.2, verifica-se que não ocorreu a rotura por esmagamento das escoras de betão quando a secção rompe. A rotura ocorre pelo esgotamento da capacidade resistente dos estribos

O aço da armadura de esforço transversal começa a reduzir a sua resistência à tração quando a temperatura nela instalada for superior a 400°C (para o aço laminado a quente).

Dado que o recobrimento das armaduras é considerável, a capacidade resistente conferida pelas armaduras de esforço transversal começa a diminuir passado 30 minutos, no caso do Método da Isotérmica dos 500°C, e 35 minutos, no Método das Zonas. A partir desses instantes há uma maior aceleração na diminuição dessa capacidade resistente, ver no gráfico da Figura 5.9, até atingir a rotura.

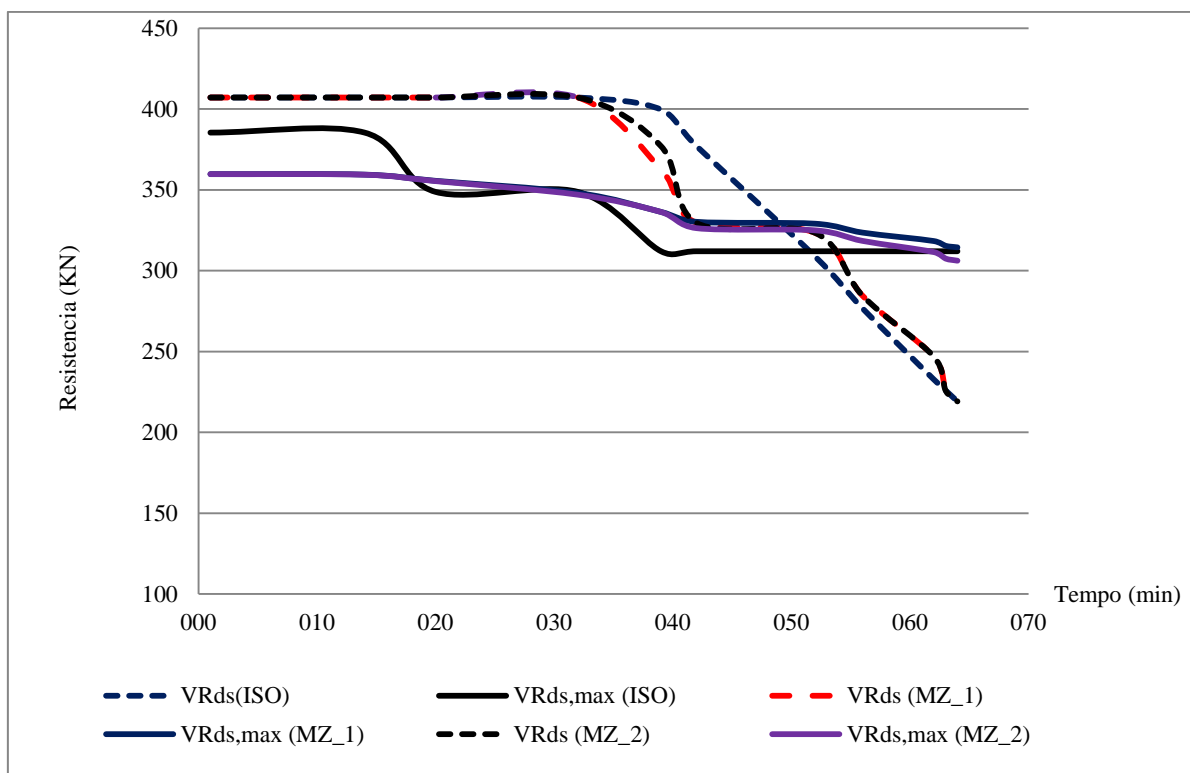


Figura 5.9: Variação das resistências ao esforço transversal e esforço transversal máximo para o Exemplo A.2

Na Figura 5.9,  $V_{Rds}$  (ISO) significa esforço transversal resistente,  $V_{Rds, max}$  (ISO) significa esforço transversal resistente máximo dado pelo Método da Isotérmica dos 500°C,  $V_{Rds}$  (MZ\_1) e  $V_{Rds, max}$  (MZ\_1) significam esforço transversal resistente e esforço transversal resistente máximo dados pelo Método das Zonas quando calculado o fator de redução do betão a meia altura da secção e  $V_{Rds}$  (MZ\_2) e  $V_{Rds, max}$  (MZ\_2) tem o mesmo significado que o anterior, mas quando é calculado o fator de redução a altura  $h_{ef}$ .

### 5.3. TORSÃO

A verificação da resistência ao fogo numa secção pode ser feita quer para o caso da torção Isolada como no caso da torção combinada com o esforço transversal.

Para a validação da aplicação desenvolvida referente à verificação de segurança à torção será feita três exemplos, que serão denominadas de Exemplo B.1, Exemplo B.2 e Exemplo C.1.

No Exemplo B.1 e no Exemplo B.2 será analisada uma secção submetida à torção sendo no primeiro uma secção cheia e no segundo uma secção oca, e no Exemplo C.1, será analisada uma secção cheia submetida ao efeito combinado de torção e esforço transversal.

Tal como nos Exemplos anteriores, também para os próximos exemplos será aplicada um fator de redução  $\eta_{fi} = 0,70$  ao valor das ações à temperatura ambiente, para obter o valor das ações em situação de incêndio.

Os fatores de segurança do aço e do betão são de  $\gamma_s = 1,15$  e de  $\gamma_s = 1,50$  para a análise à temperatura ambiente e unitários para a análise em situação de incêndio. Será utilizado um aço A500NR e o betão B25/30.

A verificação da segurança ao à torção da secção em situação de incêndio feita neste trabalho é de acordo com o Método da Isotérmica dos 500°C pelas duas alternativas apresentadas no Capítulo 4.

### 5.3.1. EXEMPLO B.1: ANÁLISE DA TORSÃO ISOLADA NUMA SECÇÃO CHEIA

As características geométricas da secção a analisar são  $40 \times 50 \text{ cm}^2$ , o recobrimento das armaduras considerado é de  $3 \text{ cm}$ . Admite-se que a viga é simplesmente apoiada e tem um vão 6 metros e que esta sujeita a uma ação à temperatura ambiente de  $72,4 \text{ KN}$ . A esta ação correspondem a um esforço transversal de  $217,2 \text{ KN}$  e a um momento fletor de  $325,8 \text{ KN.m}$ . Considera-se um momento torsor de  $30,0 \text{ KN.m}$  à temperatura ambiente.

Em situação de incêndio, após aplicar um fator de redução de  $\eta_{fi} = 0,70$  os valores dos esforços atuante passam a ser: Momento fletor ( $M_{sd}$ )  $228,06 \text{ KN.m}$ , o esforço transversal ( $V_{sd}$ ) de  $152,418 \text{ NK}$  e momento torsor de ( $T_{sd}$ ) de  $21 \text{ KN.m}$ .

Será feita o dimensionamento à temperatura ambiente e posterior análise em situação de incêndio. Para a torsão isolada a análise será feita para uma duração de 49 minutos e posteriormente será feita uma análise na aplicação desenvolvida.

#### 5.3.1.1. Cálculo à temperatura ambiente

Na análise à temperatura ambiente, para dimensionamento à flexão e ao esforço transversal, os procedimentos são os mesmos que do Exemplo A.1, adicionados a parte da torsão.

De acordo com o momento atuante à temperatura ambiente a área de armadura de tração é apresentada na Equação 5.16.

$$\mu = \frac{M_{Rd}}{b_w d^2 f_{cd}} = \frac{325,8}{0,40 \times 0,47^2 \times 16,667 \times 10^3} = 0,220$$

De acordo com o ábaco apresentado em [21]  $\omega = 0,253$  e a área de armadura  $A_{sl}$  será: (5.16)

$$A_{sl} = b_w d \omega \frac{f_{cd}}{f_{syd}} = 18,23 \text{ cm}^2 \text{ logo } \rho_1 = 9,698 \times 10^{-3} \leq 0,02$$

Após o cálculo da armadura faz-se a verificação da necessidade de armadura de esforço transversal, apresentada na Equação 5.17.

$$C_{Rd,c} = 0,12; k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \Leftrightarrow k = 1 + \sqrt{\frac{200}{470}} \leq k = 1,65 < 2 \Leftrightarrow k = 1,65;$$



$$v_{\min} = 0,6 \left[ 1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] = 0,54 \quad (5.17)$$

$$V_{Rd,c} = \left[ C_{Rd,c} \times k \times (100 \times \rho_1 \times f_{ck})^{1/3} + k_1 \times \sigma_{cp} \right] \times b_w \times d = 107,74 \text{KN}, \text{ Com}$$

$$\text{o mínimo de: } V_{Rd,c \min} = (v_{\min} + k_1 \times \sigma_{cp}) \times b_w \times d = 101,7 \text{kN} < V_{Rdc}$$

$$T_{Rd,c} = 2 \times A_k \times t_{ef} \times f_{ctd} = 2 \times 0,1123 \times 0,80 \times 1,20 \times 10^3 = 215,616 \text{KN.m}$$

Logo há necessidade de armadura de esforço transverso visto que  $V_{rdc} < V_{ed}$  ( $107,74 < 217,2$ ) e    calculado utilizando a Equa  o 5.18.

Para o cáculo armadura de esforço transverso    necessário saber os ângulos da escora comprimida e dos estribos. Este último para, para o exemplo    considerado    90  C, enquanto o ângulo da escora comprimida    determinada de acordo com a Equa  o 5.18.

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \times b_w \times z \times v_1 \times f_{cd}}{(\cot \theta + \tan \theta)}$$

$$\Leftrightarrow 217,2 = \frac{1 \times 0,40 \times 0,9 \times 0,47 \times 0,54 \times 16,667 \times 10^3}{\left( \cot \theta + \frac{1}{\cot \theta} \right)} \quad (5.18)$$

$$\Leftrightarrow 217,2 \cot^2 \theta - 1522,74 \cot \theta + 217,2 = 0 \Leftrightarrow \cot \theta = 6,87 \cup \cot \theta = 0,15$$

Admite-se que  $\cot \theta = 2.5$  de forma a obter a área mínima capaz de resistir ao esforço transverso atuante. Essa   rea    de:

$$\left( \frac{A_{sw}}{S} \right)_{\min} = \frac{0,08 \sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \times b = 2,40 \text{cm}^2 / \text{m}$$

$$\left( \frac{A_{sw}}{S} \right)_{V_{Ed}} = \frac{V_{Rd,s}}{z \times f_{ywd} \times \cot \theta} = 4,12 \text{cm}^2 / \text{m} > \left( \frac{A_{sw}}{S} \right)_{\min} \quad (5.19)$$

De acordo com a Equa  o 5.20 o valor do esforço transverso máximo    de 525,08KN.

$$V_{Rds,max} = \frac{\alpha_{cw} \times b_w \times z \times v_1 \times f_{cd}}{(\cot \theta + \tan \theta)} = 525,08 \text{KN} \quad (5.20)$$

Como foi referido no Capítulo 3 as áreas das armaduras de esforço transverso e torço são calculados de forma separada, n   obstante os dois juntos contrib  em para a verifica  o da segurança da sec  o. De seguida será apresentada as áreas das armaduras transversais e longitudinais de torsão.

$$t_{ef} = \frac{A}{u} = \frac{0,20}{1,80} = 0,1111 \text{m}, \text{ Com um valor mínimo de:}$$

$$t_{ef, \min} = 2 \left( c + \frac{\Phi}{2} \right) = 2 \left( 3 + \frac{2}{2} \right) = 8,0 \text{ cm} = 0,080 \text{ m}$$

$$A_k = (0,40 - 0,1111) \times (0,50 - 0,1111) = 0,1123 \text{ cm}^2$$

$$u_k = 2((0,40 - 0,1111) + (0,50 - 0,1111)) = 1,356 \text{ m}$$

Para a torção é necessário calcular tanto a armadura transversal como a armadura longitudinal. Na Equação seguinte é apresentada as áreas de armaduras necessárias para resistir à torção atuante.

A área de armadura transversal é dada por:

$$\left( \frac{A_{sw}}{s} \right)_{T_{Ed}} = \frac{T_{sd}}{2 \times A_k \times f_{yd} \times \cot \theta} = 1,23 \text{ cm}^2 / \text{m} \quad (5.21)$$

$A_{sl}$  área de armadura longitudinal é:

$$A_{sl, T} = \frac{T_{sd} \times u_k \times \cot \theta}{2 \times A_k \times f_{yd}} = 10,41 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

#### 5.3.1.2. Cálculo em situação de incêndio

Para a análise da secção em situação de incêndio as solicitações atuantes sofrem uma redução de 70%. O betão não sofre nenhuma redução.

O momento resistente em situação de incêndio é calculada de acordo com a temperatura instalada na armadura longitudinal, que para o caso é de 566,80.

$$k_{s,e}(\theta) = 0,78 - (\theta - 500) \times ((0,78 - 0,47) / (600 - 500)) = 0,598$$

$$f_{yd, fi} = k_s(\theta) \times f_{yd} = 299,17 \text{ MPa} \quad (5.22)$$

$$M_{Rd, fi} = A_s \times 0,9 \times d \times f_{yd, fi} = 18,23 \times 10^{-4} \times 0,9 \times 0,47 \times 432,24 \times 10^3 = 238,04 \text{ KN.m}$$

No estribo é aplicado um fator de redução calculado de acordo com a temperatura à altura  $h_{ef}$ . Esta altura é calculada de acordo com a Equação 5.8 apresentada atrás. Para a secção em análise a altura efetiva será de:

$$h_{c, ef} = \min \left\{ 2,5 \times (h - d); \frac{(h - x)}{3}; \frac{h}{2} \right\} = \min \left\{ 2,5 \times (0,50 - 0,47); \frac{(0,50 - x)}{3}; \frac{0,50}{2} \right\}$$

Com o valor de  $x$  dado por:

$$x = \frac{A_s \times f_{yd, fi}}{f_{cd, fi} \times 0,8 \times b} = \frac{18,23 \times 10^{-4} \times 500}{25 \times 0,80 \times 0,3619} = 0,1259 \text{ m} \quad (5.23)$$

$$h_{c, ef} = 0,075 \text{ m}$$

Para a altura  $h_{c,ef} = 0,075m$  a temperatura é de 474,10 e a redução da sua resistência e o esforço transversal resistente em situação de incêndio são:

$$\begin{aligned} k_s(\theta) &= 1,00 - (\theta - 400) \times ((1,00 - 0,78) / (500 - 400)) = 0,839 \\ f_{ywd,fi} &= k_s(\theta) \times f_{yd} = 418,497 MPa \\ V_{Rds,fi} &= \frac{A_{sw}}{S} \times z \times f_{ywd} \times \cot \theta = 4,12 \times 10^{-4} \times 0,9 \times 0,47 \times 418,497 \times 2,5 = 182,34 KN \end{aligned} \quad (5.24)$$

Após 49 minutos de exposição ao Incêndio Padrão ao fazer a análise pela Alternativa\_1, proposto neste trabalho, as características da secção transversal e o respetivo esforço tórsores resistentes conferidas pelas armaduras transversais e longitudinais são:

$$\begin{aligned} A_{fi,1} &= 0,3619 \times 0,4762 = 0,172m^2; \\ u_{fi,1} &= 2 \times (0,3619 + 0,4762) = 1,676m \\ t_{ef,fi} &= (A_{fi,1} / u_{fi,1}) = 0,103m > 0,08m \\ A_{kfi,1} &= (0,3619 - 0,103) \times (0,4762 - 0,103) = 0,097m^2 \\ u_{kfi,1} &= 2 \times ((0,3619 - 0,103) + (0,4762 - 0,103)) = 1,264m \\ T_{Rdw,fi,1} &= \left( \frac{A_{sw}}{S} \right) \times 2 \times A_{kfi,1} \times f_{ywd,fi} \times \cot \theta = 24,372 KN.m \\ T_{Rdl,fi,1} &= \frac{A_{sl} \times 2 \times A_{kfi,1} \times f_{yd,fi}}{u_{kfi,1} \times \cot \theta} = 18,119 KN.m \end{aligned} \quad (5.25)$$

Na Equação 5.25  $T_{Rdw,fi,1}$  é o momento tórsores resistente em situação de incêndio conferido pela armadura transversal de torção e  $T_{Rdl,fi,1}$  também é o momento resistente, mas obtido a partir da armadura longitudinal de torção.

Para o tempo de análise considerado há uma rotura por esgotamento da capacidade resistente da armadura longitudinal de torção.

Quando é utilizado a Alternativa\_2 a características da secção transversal não sofrem alterações, mas a espessura eficaz sofre uma redução ao longo do tempo, de acordo com a localização da Isotérmica dos 500°C apresentada na Figura 5.10.

Os resultados da análise pela Alternativa\_2 são os seguintes:

$$\begin{aligned} A_{fi,2} &= A = 0,20m^2; u_{fi,2} = u = 1,80 \\ t_{ef,fi,2} &= t_{ef} - ISO = 0,1111 - 2 \times (0,019) = 0,073m < 0,08 \Rightarrow t_{ef,fi,2} = 0,080m \\ A_{kfi,2} &= (0,3619 - 0,080) \times (0,4762 - 0,080) = 0,1117m^2 \end{aligned}$$

$$u_{kfi,2} = 2 \times ((0,3619 - 0,080) + (0,4762 - 0,080)) = 1,356m \quad (5.26)$$

$$T_{Rdw,fi,2} = \left( \frac{A_{sw}}{s} \right) \times 2 \times A_{kfi,2} \times f_{ywd,fi} \times \cot \theta = 28,646KN.m$$

$$T_{Rdl,fi,2} = \frac{A_{sl} \times 2 \times A_{kfi,2} \times f_{yd,fi}}{u_{kfi,1} \times \cot \theta} = 20,524KN.m$$

Pela Alternativa\_2, após o tempo de análise escolhido, a secção ainda resiste à torsão, o que mostra que esse segundo método é menos conservativo.

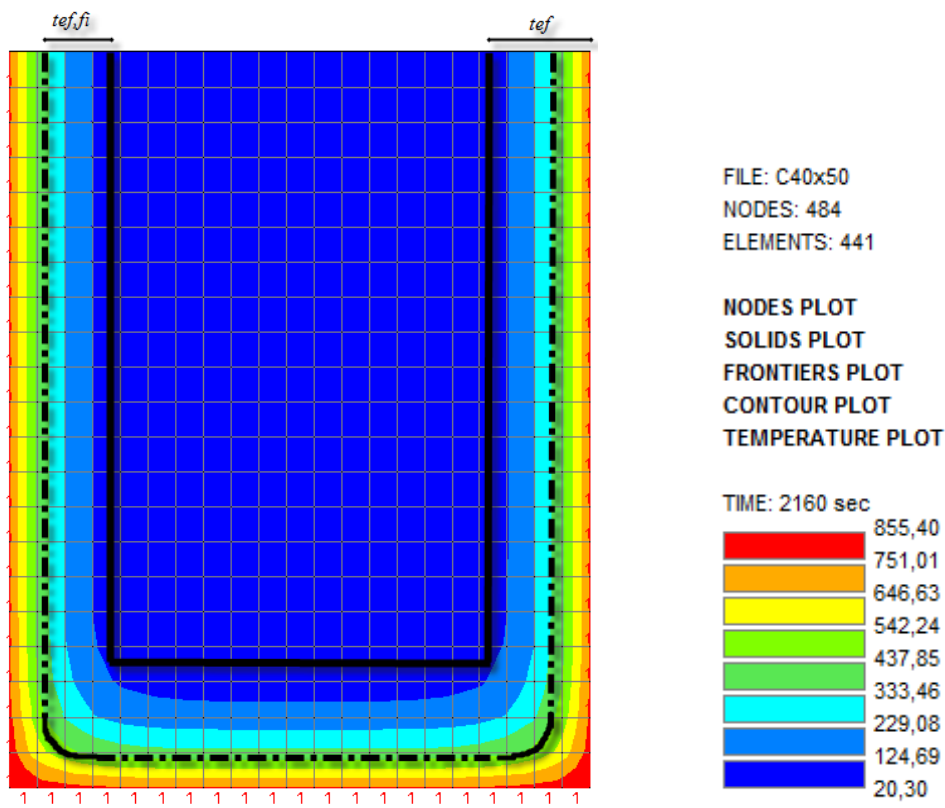


Figura 5.10: Cálculo da espessura efetiva pela Alternativa\_2

- Cálculo utilizando a aplicação computacional desenvolvida

A aplicação desenvolvida para a análise dos elementos de betão armado em situação de incêndio permite fazer o cálculo de acordo com a Alternativa\_1 e a Alternativa\_2 apresentado.

Na Tabela 5.7 é apresentado os resultados para cada uma das alternativas a cima mencionadas, de acordo com o tempo de resistência obtido na utilização das mesmas.

Tabela 5.7: Variação da espessura efetiva e da torsão para a secção cheia

	Tempo	5	15	25	35	40	44	45	48	49
Alternativa_1	$t_{ef,fi,1}$	0.1111	0.1087	0.1028	0.1028	0.1028	0.1005	0.1005	0.1005	0.1005
	$T_{Rdw,fi,1}$	34.546	32.919	29.747	29.747	29.309	25.897	25.436	24.099	23.669
	$T_{Rdl,fi,1}$	34.510	33.831	31.845	28.209	24.993	21.412	20.676	18.566	17.889
Alternativa_2	$t_{ef,fi,2}$	0.1111	0.0873	0.0800	0.0800	0.0800	0.0800	0.0800	0.0800	0.0800
	$T_{Rdw,fi,2}$	34.546	37.394	34.344	34.344	33.838	29.560	29.035	27.508	27.018
	$T_{Rdl,fi,2}$	34.510	38.431	36.766	32.568	28.856	24.441	23.601	21.193	20.419

Na Tabela 5.7 o tempo vem em minutos e as resistências em  $KN.m$ .

A resistência da secção à torsão em situação de incêndio é maior quando é utilizado o Método da Isotérmica dos  $500^{\circ}C$  Alternativa\_2 do que quando é Utilizado Alternativa\_1. Nos primeiros minutos de análise os resultados são iguais, mas a partir do instante em que a secção e as armaduras começam a sentir o efeito de temperatura os valores tornam-se diferentes.

A espessura efetiva da primeira alternativa é maior do que na segunda, por isso a área,  $A_k$ ; delimitada pela linha média e o respetivo perímetro são menores na Alternativa\_1, o que provoca uma menor capacidade resistente da secção.

Na passagem do minuto 14 para o minuto 15 a espessura efetiva reduz nos dois métodos. Para a mesma secção reduzida, a redução do  $t_{ef}$  provoca o aumento da área  $A_k$ ; e do seu perímetro  $u_k$ . A redução da área é pouco expressiva quando comparada com a redução do perímetro, por isso, naquele instante de tempo os valores das resistências aumentam. À medida que o tempo de análise avança este aumento vai sendo compensado pela redução da resistência do aço.

Uma das diferenças verificadas nas duas alternativas é a maior diminuição da espessura eficaz na Alternativa\_2, atingindo o mínimo em 25 minutos, do que na Alternativa\_1

A secção analisada pela Alternativa\_1 resiste durante 44 minutos de Incêndio Padrão e quando analisada pela Alternativa\_2 resiste durante 48 minutos, rompendo, em ambos os casos, pelo esgotamento da capacidade resistente da armadura longitudinal de torsão.

### 5.3.2. EXEMPLO B.2: ANÁLISE DA TORSÃO ISOLADA NUMA SECÇÃO OCA

As características geométricas da secção a oca analisar são  $40 \times 50 \text{ cm}^2$ , com a espessura da alma de 10 cm. O recobrimento das armaduras considerado é de 3 cm. Admite-se que a viga esta sob os mesmos efeitos que a secção cheia apresentada no Exemplo B.1, quer à temperatura ambiente como em situação de incêndio.

Para a análise a frio admite-se que a secção possui as mesmas armaduras que a secção cheia do Exemplo B.1, por isso neste Subcapítulo só é apresentada o comportamento em situação de incêndio.

## 5.3.2.1. Cálculo em situação de incêndio

As características geométricas da secção oca a analisar são  $40 \times 50 \text{ cm}^2$ , com a espessura da alma de 10 cm. O recobrimento das armaduras considerado é de 3 cm. Admite-se que a viga está sob os mesmos efeitos que a secção cheia apresentada no Exemplo B.1, quer à temperatura ambiente como em situação de incêndio.

Para a secção oca os resultados para as duas alternativas são iguais, porque a espessura da alma é independente do método utilizado e é constante. A redução da secção transversal é a mesma.

Para o cálculo manual pode-se seguir os mesmos procedimentos seguidos na secção cheia, considerando agora que a espessura efetiva corresponde à espessura da alma, que também deve obedecer a mínima prevista.

A seguir são apresentados os resultados obtidos na análise da secção oca, quando é utilizado a aplicação desenvolvida.

Tabela 5.8: Variação da espessura efetiva e da torsão para a secção oca

	Tempo	5	15	25	35	40	45	46	47
Alternativa_1	$t_{ef,fi,1}$	0.100	0.0800	0.0800	0.0800	0.0800	0.0800	0.0800	0.0800
	$T_{Rdw,fi,1}$	36.8987	38.9838	34.3429	34.3429	33.8366	29.0337	28.5153	28.0040
	$T_{Rdl,fi,1}$	35.6927	36.8571	34.2935	30.3779	26.9149	22.1211	21.3445	20.5989

A secção oca resiste durante 46 minutos de Incêndio Padrão. Tal como na secção cheia, na passagem do minuto 14 para 15, há um aumento das resistências, por causa da diminuição da espessura eficaz, que se estabiliza nos minutos seguintes.

No gráfico da Figura 5.11 é feita uma comparação para as duas secções analisadas, em que os significados dos parâmetros utilizados são:  $T_{Rdw\_1}$  e  $T_{Rdw\_2}$ , significam momento torsor resistente em situação de incêndio conferido pela armadura transversal de torção quando é utilizado a Alternativa\_1 e/ou a Alternativa\_2 respetivamente.  $T_{Rdl\_1}$  e  $T_{Rdl\_2}$ , têm o mesmo significado que o anterior só que são obtidos a partir das armaduras longitudinais de torção. O momento torsor resistente em situação de incêndio para a secção oca é representado por  $T_{Rdw\_O}$  e  $T_{Rdl\_O}$ , referentes às armaduras transversais e longitudinais.

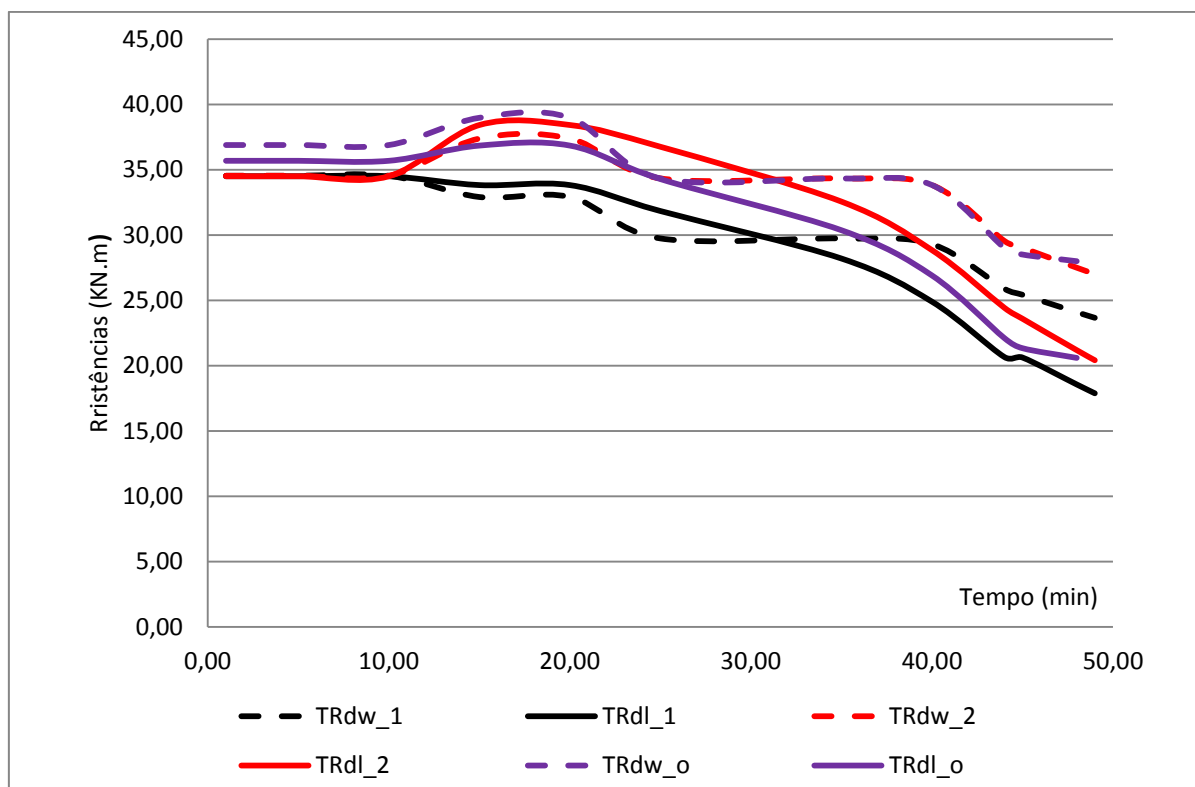


Figura 5.11: Comparação dos resultados entre a secção cheia e a secção oca

O momento torsor resistente para a secção cheia e para a secção oca são constantes do início do incêndio até aos 14 minutos. A partir desse instante os efeitos do aumento de temperatura começam a traduzir-se na redução da geometria da secção, o que leva a diminuição da espessura efetiva,  $t_{ef}$ , que por sua vez provoca o aumento da área delimitada pela linha média desta espessura,  $A_k$ , e o respetivo perímetro  $u_k$ . Estes aumentos provocam o aumento instantâneo dos momentos torsores, voltando a diminuir quando as armaduras começarem a sentir o efeito do aumento de temperatura.

Nos 25 minutos iniciais a torsão resistente obtida pela armadura transversal de torção é maior na secção oca que na secção cheia. Neste período inicial a espessura efetiva prevista para a secção oca é menor do que a calculada na secção cheia pelas duas alternativas e vai diminuindo até atingir o valor mínimo.

Como a espessura efetiva calculada para a secção cheia (de 0,1111) é muito próximo da secção oca (0,100) a espessura mínima é atingida no mesmo instante. A partir deste instante as resistências são praticamente coincidentes, já que o efeito de temperatura nas armaduras são iguais para os dois casos.

Quando é utilizado a Alternativa\_1 a espessura efetiva calculada na secção cheia mantém-se maior que a secção oca, por isso a área e o perímetro são menores e os valores da torsão resistente também permanecem menores durante o tempo de resistência da secção.

Tanto a secção cheia como a secção oca rompem pelo esgotamento da capacidade resistente da armadura longitudinal, pois nos dois casos essas armaduras encontram-se submetidas a maiores temperaturas que os estribos de torsão.

A resistência à torsão isolada é maior quando foi utilizado a Alternativa\_2 porque a espessura efetiva é menor e a área  $A_k$  é maior, sendo que as reduções das resistências das armaduras e a redução da secção permanecem iguais

#### 5.4. EXEMPLO C.1: ANÁLISE DA TORSÃO COMBINADA COM O ESFORÇO TRANSVERSO

Para o efeito combinado é analisado a mesma secção com o mesmo valor dos esforços calculados no Exemplo B.1 e será feita a combinação entre a torção e o esforço transversal.

##### 5.4.1. CÁLCULO À TEMPERATURA AMBIENTE

Os esforços calculados à temperatura ambiente continuam a ser válidos, e o primeiro passo consiste na verificação da necessidade de dimensionamento ao efeito combinado de esforço transversal e momento torsor.

Para fazer essa verificação é utilizado os resultados obtidos na Equação 5.17, assim têm-se:

$$\begin{aligned} V_{Rd,c} &= 107,74 \text{ KN} , \\ T_{Rd,c} &= 215,616 \text{ KN.m} \\ \frac{T_{Sd}}{T_{Rd,c}} + \frac{V_{Sd}}{V_{Rd,c}} &\leq 1 \Leftrightarrow 2,016 > 1, \end{aligned} \quad (5.17.a)$$

Por isso é necessário dimensionar ao efeito combinado do esforço transversal e da torsão.

Para além de verificar a necessidade de dimensionamento também é necessário verificar se ocorre o esmagamento da escora comprimida de betão. Para que não ocorra o esmagamento da escora comprimida de betão é necessário que o efeito combinado de esforço transversal e de momento torsor satisfaça a seguinte condição:

$$\frac{T_{Sd}}{T_{Rd,max}} + \frac{V_{Sd}}{V_{Rd,max}} \leq 1; \quad (5.27)$$

$$\text{Com } T_{Rd,max} = 2 \times \alpha_{cw} \times v \times A_k \times f_{cd} \times t_{ef} \times \sin \theta \cos \theta$$

O ângulo da escora comprimida é igual para o esforço transversal e para a torção, portanto o valor será de 21,8014, cuja  $\cot \theta = 2.5$ .

Como o esforço transversal máximo já tinha sido calculado no Exemplo B.1, Equação 5.20, então da Equação 5.27 têm-se:



$$T_{Rd,max} = 2 \times 1 \times 0,54 \times 0,1111 \times 16666,7 \times \sin(21,8014) \times \cos(21,8014) = 689,59 \text{ KN.m}$$

$$\frac{T_{Sd}}{T_{Rd,max}} + \frac{V_{Sd}}{V_{Rd,max}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,46 < 1; \quad (5.27.a)$$

Verifica o não esmagamento das escoras comprimidas de betão, por isso confirma-se que o dimensionamento feito no Exemplo B.1 continua a ser Valido e as áreas das armaduras são:

$$\left( \frac{A_{sw}}{s} \right)_{V_{Ed}} = 4,12 \text{ cm}^2 / \text{m}; \left( \frac{A_{sw}}{s} \right)_{T_{Ed}} = 1,23 \text{ cm}^2 / \text{m};$$

$$\left( \frac{A_{sw}}{s} \right)_{T_{Ed}}^{Total} = \left( \frac{A_{sw}}{s} \right)_{V_{Ed}} + \left( \frac{A_{sw}}{s} \right)_{T_{Ed}} = 5,35 \text{ cm}^2 / \text{m} > \left( \frac{A_{sw}}{s} \right)_{\min}$$

$$A_{sl} = 18,23 \text{ cm}^2 / \text{m}; A_{sl_T} = 10,41 \text{ cm}^2 / \text{m}; A_{sl}^T = A_{sl} + A_{sl_T} = 28,64 \text{ cm}^2 / \text{m};$$

#### 5.4.2. CÁLCULO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Para a secção em situação de incêndio a análise será feita para uma duração de 48 minutos e é utilizado as áreas totais calculadas a frio.

O dimensionamento da armadura transversal para o efeito combinado do esforço transversal e momento torsor em situação de incêndio terá de ser efetuado se não for respeitada a condição da Equação 5.28.

$$\frac{T_{Sd,fi}}{T_{Rdc,fi}} + \frac{V_{Sd,fi}}{V_{Rdc,fi}} \leq 1; \quad (5.28)$$

A secção quando submetida ao efeito combinado de esforço transversal e momento torsor utiliza a armadura total para resistir. Esta quantidade total é utilizada de acordo com as necessidades para cada efeito isolado.

Para o Exemplo C.1 admite-se as mesmas áreas de armadura transversal e longitudinal de torsão, sendo que para a flexão e para o esforço transversal é utilizada as áreas calculadas a frio.

Após 47 minutos de exposição ao fogo a armadura longitudinal flexão e de torsão ficam submetidas a uma temperatura de 552,70°C e as armaduras de esforço transversal e transversais de torsão ficam sob uma temperatura de 467,20°C.

O betão sofre uma redução da sua geometria, porque passado 48 minutos nas faces expostas ao fogo a temperatura começa a ultrapassar os 500°C.

O momento fletor e o esforço transversal resistente são independentes da alternativa escolhida, portanto são iguais nas duas alternativas. Na Equação 5.29. é apresentada os resultados do momento

flector e esforço transverso no fim análise (nos 48 minutos), após ter reduzido a resistências das armaduras de acordo com a temperatura a que estão espostas como o indicado a cima.

$$V_{Rds,fi} = \frac{A_{sw}}{S} \times z \times f_{ywd} \times \cot \theta = 211.53 KN \quad (5.29)$$

$$M_{Rd,fi} = A_s \times 0.9 \times d \times f_{yd,fi} = 237.6 KN.m$$

Quando é feita a análise pela Alternativa\_1, as características da secção transversal e o respetivo momento torsor resistente conferidas pelas armaduras transversais e longitudinais de torsão são:

$$A_{fi,1} = 0.3619 \times 0.4762 = 0.172 m^2;$$

$$u_{fi,1} = 2 \times (0.3619 + 0.4762) = 1.676 m$$

$$t_{ef,fi} = (A_{fi,1} / u_{fi,1}) = 0.103 m > 0.08 m$$

$$A_{kfi,1} = (0.3619 - 0.103) \times (0.4762 - 0.103) = 0.097 m^2$$

$$u_{kfi,1} = 2 \times ((0.3619 - 0.103) + (0.4762 - 0.103)) = 1.264 m$$

$$T_{Rdw,fi,1} = \left( \frac{A_{sw}}{S} \right) \times 2 \times A_{kfi,1} \times f_{ywd,fi} \times \cot \theta = 25.01 KN.m > T_{Sd,fi} \quad (5.30)$$

$$T_{Rdl,fi,1} = \frac{A_{sl} \times 2 \times A_{kfi,1} \times f_{yd,fi}}{u_{kfi,1} \times \cot \theta} = 17.89 KN.m$$

$$T_{Sd,fi} > T_{Rdw,fi} \& \& V_{Sd,fi} \leq V_{Rds,fi}$$

Mesmo havendo uma capacidade para resistir ao esforço transverso (calculado em 5.29), a secção acaba por romper pelo esgotamento da capacidade resistente da armadura longitudinal de torsão (calculada na Equação 5.30).

Quando é utilizado a Alternativa\_2 a características da secção transversal não sofrem alterações, mas a espessura eficaz sofre uma redução ao longo do tempo, de acordo com a localização da Isotérmica dos 500°C apresentada na Figura 5.10.

Os resultados da análise pela Alternativa\_2 são as seguintes:

$$t_{ef,fi,2} = t_{ef} - ISO = 0.1111 - 2 \times (0.019) = 0.073 m < 0.08 \Rightarrow t_{ef,fi,2} = 0.080 m$$

$$A_{kfi,2} = (0.3619 - 0.080) \times (0.4762 - 0.080) = 0.1117 m^2$$

$$u_{kfi,2} = 2 \times ((0.3619 - 0.080) + (0.4762 - 0.080)) = 1.356 m$$

$$T_{Rdw,fi,2} = \left( \frac{A_{sw}}{S} \right) \times 2 \times A_{kfi,2} \times f_{ywd,fi} \times \cot \theta = 28.55 KN.m \quad (5.31)$$

$$T_{Rdl,fi,2} = \frac{A_{sl} \times 2 \times A_{kfi,2} \times f_{yd,fi}}{u_{kfi,1} \times \cot \theta} = 20.42 KN.m$$

$$T_{Sd,fi} > T_{Rdw,fi} \text{ \& \& } V_{Sd,fi} \leq V_{Rds,fi}$$

Para o tempo de análise escolhido não verifica segurança ao efeito combinado do esforço transversal e momento torsor, tendo rompido pelo efeito combinado do esforço transversal e esgotamento da capacidade resistente das armaduras longitudinais de torção. Para a Alternativa\_1 o tempo de resistência é de 43 minutos e para a Alternativa\_2 é de 47 minutos.

Ao utilizar a aplicação desenvolvida foi adotada as mesmas armaduras utilizadas no cálculo manual. Para a armadura longitudinal de flexão utilizou-se  $6\phi 20$  e para armadura de esforço transversal utilizou-se  $2\phi 6 // 0.125$ . Na Tabela 5.9, é apresentado os resultados do esforço transversal e do momento torsor para a Alternativa \_1 e Alternativa\_2.

Tabela 5.9: Resultados para o efeito combinado de esforço transversal momento torsor

	Tempo	5	15	25	35	40	44	45	47	48
Alternativa_1	$t_{ef,fi,1}$	0.1111	0.1087	0.1028	0.1028	0.1028	0.1005	0.1005	0.1005	0.1005
	$T_{Rdw,fi,1}$	34.546	32.919	29.747	29.747	29.309	25.897	25.436	24.099	25.001
	$T_{Rdl,fi,1}$	34.510	33.831	31.845	28.209	24.993	21.412	20.676	18.566	17.892
Alternativa_2	$t_{ef,fi,2}$	0.1111	0.0873	0.0800	0.0800	0.0800	0.0800	0.0800	0.0800	0.0800
	$T_{Rdw,fi,2}$	34.546	37.394	34.344	34.344	33.838	29.560	29.035	27.508	28.545
	$T_{Rdl,fi,2}$	34.510	38.431	36.766	32.568	28.856	24.441	23.601	21.193	20.423

No gráfico da Figura 5.12 é apresentado a relação entre os esforços atuantes e resistentes para cada uma das alternativas estudadas na análise da torção combinada com o esforço transversal:

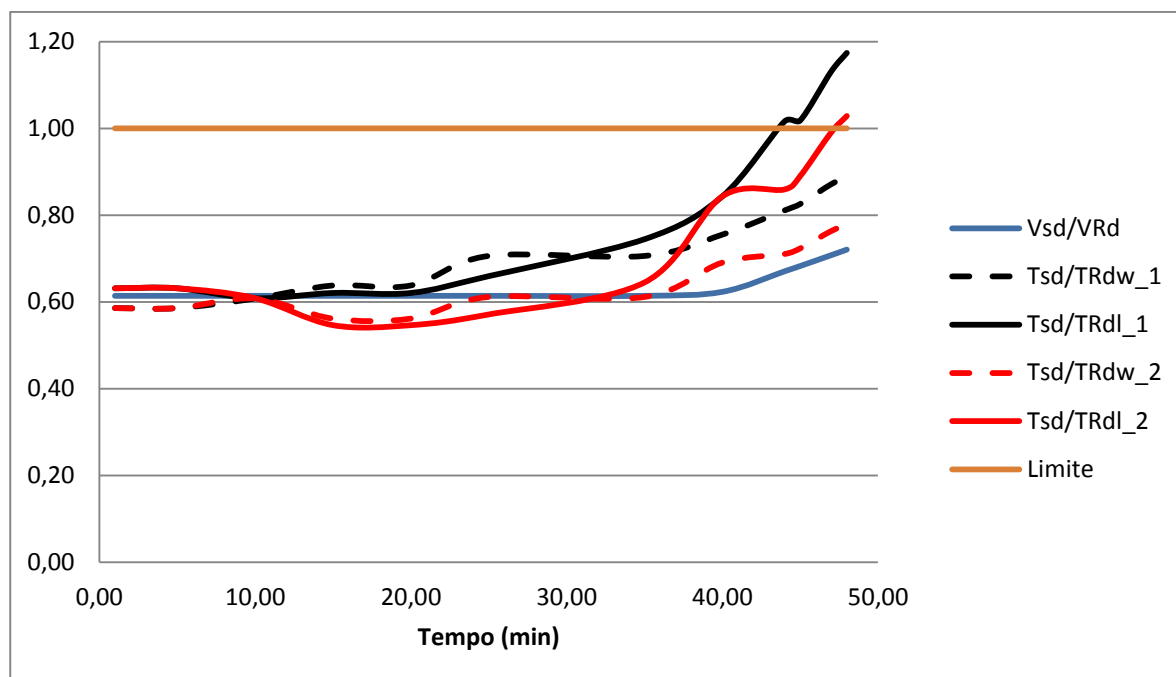


Figura 5.12: Relação entre o esforço transversal e o momento torsor.

Quando se combinado o momento torsor resistente obtido pela armadura transversal, com o esforço transversal resistente em situação de incêndio a segurança para o tempo requerido é verificada.

Quando se combina o esforço transversal com o momento torsor resistente obtido pela armadura longitudinal, ocorre a rotura por esgotamento da capacidade resistente desta última.

## 6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 6.1. CONCLUSÕES DO TRABALHO

A realização deste trabalho permitiu retirar algumas conclusões, das quais indicam-se:

- Os procedimentos para a verificação da segurança ao corte dos elementos de betão armado em situação de incêndio apresentados no EC2-1-2 são omissos e carecem de melhorias. Um exemplo deste fato é o cálculo da espessura eficaz na análise duma secção sujeita à torção quando é utilizado o Método da Isotérmica dos 500°C para a análise.
- As aplicações aqui desenvolvidas permitem fazer análise da segurança ao corte de elementos de betão armado em situação de incêndio. Estas aplicações são de fácil utilização e apresentam resultados satisfatórios.
- Ao utilizar as aplicações desenvolvidas é possível conhecer o tempo limite que uma secção resiste ao corte quando está sujeita ao incêndio padrão. Pode ser obtida as resistências ao corte da mesma secção para um determinado tempo pretendido até ao tempo máximo da resistência.
- Para os exemplos apresentados neste trabalho verifica-se que é possível ocorrer roturas tanto pelo esforço transversal como pela torsão em elementos de betão armado em situação de incêndio.
- Na verificação da segurança ao esforço transversal a escolha do método tem pouca influência na duração dos tempos para a ocorrência de roturas por esgotamento da capacidade resistente do estribo.
- Na análise pelo Método das Zonas, a capacidade resistente ao esmagamento das escoras comprimidas de betão é menor quando o fator de redução do betão é calculado a uma altura  $h_{cef}$  do que quando é calculado a uma altura  $H/2$  da secção.
- Em situação de incêndio a dificilmente ocorre a rotura por esmagamento das escoras comprimidas de betão, porque a partir dum certo período de duração do incêndio a degradação da capacidade resistente dos estribos é mais acelerada do que as do betão.
- O Método da Isotérmica dos 500°C Alternativa\_1, proposto neste trabalho é mais conservativo que a Alternativa\_2.
- Para as duas alternativas propostas a resistência à torsão isolada são idênticas, com uma ligeira vantagem no que se refere à resistência para a secção cheia.
- De acordo com o ponto de localização para a determinação das temperaturas aqui escolhida, as armaduras transversais de torsão conferem uma maior resistência á torsão do que as armaduras

longitudinais, porque as temperaturas instaladas nas primeiras são menores do que nas últimas.

- A resistência das secções em situação de incêndio quando sujeitas ao efeito combinado de esforço transversal e momento torsor é influenciada pelas resistências conferidas pelas armaduras longitudinais e transversais de torsão, sendo que para a secção analisada, as armaduras longitudinais possuem uma maior influência na rotura.

### **6.1. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Seria interessante dar continuidade ao programa no que se refere em adaptá-lo para a análise da segurança ao fogo de outras geometrias de secções tais como em L e H, e mesmo em T, já que o mesmo não é específico para este tipo de secção (a pesar de poder ser adaptado).

Na análise da torsão pode-se incorporar a análise através do Método das Zonas, já que a aplicação feita so é utilizada o Método da Isotérmica dos 500°C.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Eurocódigo 2: Projetos de estruturas de betão 1-2: Regras gerais; *Verificação de resistência ao fogo*, NP EN 1992-1-2, 2010.
- [2] Santos, C. C. dos, *Propriedades Mecânicas residuais Apos Incêndio de Betões Normais*, Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Coimbra, Coimbra, Fevereiro de 2012.
- [3] Marques, A. F. de M., *Comportamento ao fogo de betão com agregados reciclados de borracha*, Dissertação mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Outubro de 2010.
- [4] Costa, C. N., *Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio*, Tese Doutoramento, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- [5] Eurocódigo 3: Projetos de estruturas de Aço, Parte 1-2: Regras gerais; *Verificação de resistência ao fogo*, NP EN 1993-1-2, 2010.
- [6] Eurocódigo 1: Ações em estruturas, Parte 1-2: Ações gerais; *Ações em estruturas expostas ao fogo* NP EN 1991-1-2, 2010.
- [7] Costa, C.N. e Silva, V.P., *Revisão Histórica das Curvas Padronizadas*, NUTAU, 2006.
- [8] Fernandes, M.C.V., *Verificação da Resistência ao Fogo de Estruturas de Betão com Base nos Métodos Simplificados do EC2 parte 1-2*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Fevereiro de 2008.
- [9] Gonçalves, M.J.C.R., *Comportamento ao Fogo de Elementos Estruturais de Betão Análise Numérica e Metodologia*, Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2007
- [10] Costa, Carla Neves; Silva, Valdir Pignatta. *Métodos Simplificados para o Dimensionamento de Estruturas de Concreto Sujeitas à Flexão simples, em Situação de Incêndio*, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2004.
- [11] Franssen, J.M. e Dotreppe, J.C., *Fire Tests and Calculation Methods for Circular Concrete Columns*, Fire Technology, 39(1): p. 89-97, 2003.
- [12] Xavier, H.F.B., *Analysis of Reinforced Concrete Frames Exposed to Fire Based on Advanced Calculation Methods*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Julho de 2009
- [13] Teixeira, L.F.P., *Análise e Verificação da Segurança de Pilares de Betão Armado de Edifícios em Situação de Incêndio*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Julho de 2011.
- [14] Franssen, J.M., *User's Manual for SAFIR 2007a - A Computer Program for Analysis of*

*Structures Subject to Fire*, University of Liège - Department ArGenCO Service Structural Engineering.

[15] Faria, R; Xavier, F e Real, P.V: *Modelos simplificados para a avaliação da resistência ao esforço transversal em pórticos de betão armado sob ação do fogo*, Encontro Nacional betão estrutural, Lisboa, Novembro de 2010.

[16] Eurocódigo 2: Projetos de estruturas de betão 1-2: *Regras gerais e regras para edifícios*, NP EN 1992-1-2, 2010.

[17] Faria, R.M. e Pouca, N.V: *Esforço transversal, Torção, Punçamento*, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Porto, Março de 1997

[18] *Torção em Peças de Betão Armado*, Estruturas de Betão 1, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto 2013.

[19] SAFIR - <http://www.argenco.ulg.ac.be/logiciels/SAFIR/what.html> - Acedido em Março de 2013.

[20] MATLAB - <http://www.mathworks.com/> - Acedido em Março de 2013.

[21] Figueiras, J. e Barros, H., *Tabelas e Ábacos de Dimensionamento de Secções de Betão Solicitadas à Flexão e a Esforços Axiais Segundo o Eurocódigo 2*, FEUP Edições, 2010.







## **ANEXO A**



**FEUP - Mestrado Integrado em Engenharia Civil 2012-2013**  
**Comportamento ao corte de elementos de Betão Armado em Situação de Incêndio**  
**Esforço Transverso**

<b>Características da secção</b> b (m) <input type="text" value="0"/> h (m) <input type="text" value="0"/> rec. (cm) <input type="text" value="0"/>	<b>Características dos materiais</b> fck (Mpa) <input type="text" value="0"/> fyk (Mpa) <input type="text" value="0"/> Tempo de Análise Mecânica (min) <input type="text" value="0"/>	<b>Análise Térmica</b> Nº Colunas <input type="text" value="0"/> Nº Linhas <input type="text" value="0"/> Faces expostas ao fogo (I. P.) <input type="checkbox"/> Face Superior <input type="checkbox"/> Face Esquerda <input type="checkbox"/> Face Direita <input type="checkbox"/> Face Inferior Gerar Ficheiro .in Run SAFIR Tempo de Análise Térmica (min) <input type="text" value="0"/>
<b>Esforços em situação de incêndio</b> Med,t (KN.m) <input type="text" value="0"/> Ved,t (KN) <input type="text" value="0"/> Ned,t (KN) <input type="text" value="0"/>	<b>Armaduras de esforço transverso</b> Diâmetro do estribo (mm) <input type="text" value="0"/> Espaçamento do estribo (m) <input type="text" value="0"/> Ângulo alfa (°C) <input type="text" value="0"/>	<b>Armaduras de tracção</b> <input type="radio"/> Único Diâmetro <input type="radio"/> Dois diâmetros Único diâmetro: Nº <input type="text" value="0"/> D (mm) <input type="text" value="0"/> Dois diâmetros: Nº-1 <input type="text" value="0"/> Nº-2 <input type="text" value="0"/> D-1 (mm) <input type="text" value="0"/> D-2 (mm) <input type="text" value="0"/>
<b>Método de cálculo</b> <input type="radio"/> Método da Isotermica dos 500°C <input checked="" type="radio"/> Método das zonas	<b>Resultado</b> Analizar A secção analisada resiste durante <input type="text"/> minutos de fogo (IP)	<b>Resultado</b> Mrd,t (KN.m) <input type="text"/> Vrd,t (KN) <input type="text"/> A.E (fi) <input type="text"/>

Aluno: Adriano Baptista Gonçalves    Orientador: Professor Doutor Rui Faria

Figura A.1: Interface gráfica para a análise do esforço transverso antes da introdução de dados

**FEUP - Mestrado Integrado em Engenharia Civil 2012-2013**  
**Comportamento ao corte de elementos de Betão Armado em Situação de Incêndio**  
**Esforço Transverso**

<b>Características da secção</b> b (m) <input type="text" value="0.3"/> h (m) <input type="text" value="0.6"/> rec. (cm) <input type="text" value="3"/>	<b>Características dos materiais</b> fck (Mpa) <input type="text" value="25"/> fyk (Mpa) <input type="text" value="500"/> Tempo de Análise Mecânica (min) <input type="text" value="0"/>	<b>Análise Térmica</b> Nº Colunas <input type="text" value="21"/> Nº Linhas <input type="text" value="21"/> Faces expostas ao fogo (I. P.) <input type="checkbox"/> Face Superior <input checked="" type="checkbox"/> Face Esquerda <input checked="" type="checkbox"/> Face Direita <input checked="" type="checkbox"/> Face Inferior Gerar Ficheiro .in Run SAFIR Tempo de Análise Térmica (min) <input type="text" value="60"/>
<b>Esforços em situação de incêndio</b> Med,t (KN.m) <input type="text" value="128.1"/> Ved,t (KN) <input type="text" value="130.3"/> Ned,t (KN) <input type="text" value="0"/>	<b>Armaduras de esforço transverso</b> Diâmetro do estribo (mm) <input type="text" value="6"/> Espaçamento do estribo (m) <input type="text" value="0.171"/> Ângulo alfa (°C) <input type="text" value="90"/>	<b>Armaduras de tracção</b> <input type="radio"/> Único Diâmetro <input checked="" type="radio"/> Dois diâmetros Único diâmetro: Nº <input type="text" value="5"/> D (mm) <input type="text" value="20"/> Dois diâmetros: Nº-1 <input type="text" value="0"/> Nº-2 <input type="text" value="0"/> D-1 (mm) <input type="text" value="0"/> D-2 (mm) <input type="text" value="0"/>
<b>Método de cálculo</b> <input type="radio"/> Método da Isotermica dos 500°C <input checked="" type="radio"/> Método das zonas	<b>Resultado</b> Analizar A secção analisada resiste durante <input type="text"/> minutos de fogo (IP)	<b>Resultado</b> Mrd,t (KN.m) <input type="text"/> Vrd,t (KN) <input type="text"/> A.E (fi) <input type="text"/>

Aluno: Adriano Baptista Gonçalves    Orientador: Professor Doutor Rui Faria

Figura A.2: Verificação da segurança ao esforço transverso da secção  $30 \times 60 \text{ cm}^2$



**FEUP - Mestrado Integrado em Engenharia Civil 2012-2013**  
**Comportamento ao corte de elementos de Betão Armado em Situação de Incêndio**  
**Esforço Transverso**

**Características da secção**

b (m)

h (m)

rec. (cm)

**Análise Térmica**

Nº Colunas

Nº Linhas

Gerar Ficheiro .in

Tempo de Análise Térmica (min)

**Faces expostas ao fogo (I. P.)**

☐ Face Superior

☒ Face Esquerda ☒ Face Direita

☒ Face Inferior

**Esforços em situação de incêndio**

Med,t (kN.m)

Ved,t (kN)

Ned,t (kN)

**Armaduras de esforço transverso**

Diâmetro do estribo (mm)

Espaçamento do estribo (m)

Angulo alfa (°C)

**Armaduras de tracção**

☒ Unico Diâmetro ☐ Dois diâmetros

**Unico diâmetro**

Nº

D (mm)

**Dois diâmetros**

Nº-1  Nº-2

D-1 (mm)  D-2 (mm)

**Metodo de cálculo**

☐ Metodo da Isotermica dos 500°C

☒ Metodo das zonas

**Resultado**

A secção analisada resiste durante  minutos de fogo (IP)

**Resultado**

Mrd,t (kN.m)

Vrd,t (kN)

A.E (fi)

Aluno: Adriano Baptista Gonçalves    Orientador: Professor Doutor Rui Faria

Figura A.3: Resultados da verificação de segurança ao esforço transverso da secção 30x60cm<sup>2</sup>

**FEUP - Mestrado Integrado em Engenharia Civil 2012-2013**  
**Comportamento ao corte de elementos de Betão Armado em Situação de Incêndio**  
**Torção**

**Secção**

b (m)

h (m)

rec. (cm)

A secção é oca?

☒ Sim    tef (m)

**Ações em situação de incêndio**

Ted (kN.m)  Ved,t (kN)

Ned,t (kN)  Med,t (kN)

**Materiais**

fck (Mpa)

fyk (Mpa)

**Análise Térmica**

Nº Colunas

Nº Linhas

Gerar Ficheiro .in

Run SAFIR

Tempo de Análise Térmica (min)

**Faces expostas ao fogo (I. P.)**

☐ Face Superior

☐ Face Esquerda ☐ Face Direita

☐ Face Inferior

**Armaduras de Torção**

Area Longitudinal (cm²/m)

Area Transversal (cm²/m)

Angulo da escora (°C)

Tempo de Análise Mecânica (min)

**Armaduras de esforço transverso**

Diâmetro do estribo (mm)

Espaçamento do estribo (m)

Angulo alfa (°C)

**Armaduras de tracção**

☐ Unico Diâmetro ☐ Dois diâmetros

**Unico diâmetro**

Nº

D (mm)

**Dois diâmetros**

Nº-1  Nº-2

D-1 (mm)  D-2 (mm)

**Metodo de cálculo**

Análise da Torção

☒ Isolado ☐ Combinado

Isotermica dos 500°C

☒ Alternativa 1 ☐ Alternativa 2

**Resultado**

A secção analisada resiste durante  minutos de fogo (I.P)

**Resultado**

Trd,t (kN.m)

Vrd,t (kN)

Mrd,t (kN.m)

Aluno: Adriano Baptista Gonçalves    Orientador: Professor Doutor Rui Faria

Figura A.4: Interface gráfica para a análise à torsão antes da introdução de dados





**FEUP - Mestrado Integrado em Engenharia Civil 2012-2013**  
**Comportamento ao corte de elementos de Betão Armado em Situação de Incêndio**  
**Torção**

<b>Secção</b> b (m) <input type="text" value="0.4"/> h (m) <input type="text" value="0.5"/> rec. (cm) <input type="text" value="3"/> A secção é oca? <input type="checkbox"/> Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não tef (m) <input type="text" value="0"/>	<b>Ações em situação de incêndio</b> Ted (KN.m) <input type="text" value="21"/> Ved.t (KN) <input type="text" value="0"/> Ned.t (KN) <input type="text" value="0"/>	<b>Materiais</b> fck (Mpa) <input type="text" value="21"/>	<b>Análise Térmica</b> Nº Colunas <input type="text" value="21"/> Faces expostas ao fogo (I. P) <input type="checkbox"/> Face Superior <input checked="" type="checkbox"/> Face Esquerda <input checked="" type="checkbox"/> Face Direita <input checked="" type="checkbox"/> Face Inferior Tempo de Análise Térmica (min) <input type="text" value="60"/>
<b>Armaduras de Torção</b> Area Longitudinal (cm²/m) <input type="text" value="14.97"/> Area Transversal (cm²/m) <input type="text" value="2.40"/> Angulo da escora (°C) <input type="text" value="21.8021"/> Tempo de Análise Mecânica (min) <input type="text" value="60"/>	<b>Armaduras de esforço transversal</b> Diâmetro do estribo (mm) <input type="text" value="8"/> Espaçamento do estribo (m) <input type="text" value="0.2"/> Angulo alfa (°C) <input type="text" value="90"/>	<b>Unico diâmetro</b> Nº <input type="text" value="6"/> D (mm) <input type="text" value="20"/>	
<b>Metodo de cálculo</b> Análise da Torção <input checked="" type="radio"/> Isolado <input type="radio"/> Combinado Isotermica dos 500°C <input checked="" type="radio"/> Alternativa 1 <input type="radio"/> Alternativa 2	<b>Resultado</b> <input type="button" value="Analisar"/> <input type="button" value="Ajuda"/> A secção analisada resiste durante <input type="text" value=""/> minutos de fogo (I.P)		<b>Resultado</b> Trd.t (KN.m) <input type="text"/> Vrd.t (KN) <input type="text"/> Mrd.t (KN.m) <input type="text"/>

Aluno: Adriano Baptista Gonçalves    Orientador: Professor Doutor Rui Faria

Figura A.5: Verificação de segurança à torsão da secção 40x50cm<sup>2</sup>

**FEUP - Mestrado Integrado em Engenharia Civil 2012-2013**  
**Comportamento ao corte de elementos de Betão Armado em Situação de Incêndio**  
**Torção**

<b>Secção</b> b (m) <input type="text" value="0.4"/> h (m) <input type="text" value="0.5"/> rec. (cm) <input type="text" value="3"/> A secção é oca? <input type="checkbox"/> Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não tef (m) <input type="text" value="0"/>	<b>Ações em situação de incêndio</b> Ted (KN.m) <input type="text" value="21"/> Ved.t (KN) <input type="text" value="0"/> Ned.t (KN) <input type="text" value="0"/>	<b>Materiais</b> fck (Mpa) <input type="text" value="21"/>	<b>Análise Térmica</b> Nº Colunas <input type="text" value="21"/> Faces expostas ao fogo (I. P) <input type="checkbox"/> Face Superior <input checked="" type="checkbox"/> Face Esquerda <input checked="" type="checkbox"/> Face Direita <input checked="" type="checkbox"/> Face Inferior Tempo de Análise Térmica (min) <input type="text" value="60"/>
<b>Armaduras de Torção</b> Area Longitudinal (cm²/m) <input type="text" value="14.97"/> Area Transversal (cm²/m) <input type="text" value="2.40"/> Angulo da escora (°C) <input type="text" value="21.8021"/> Tempo de Análise Mecânica (min) <input type="text" value="60"/>	<b>Armaduras de esforço transversal</b> Diâmetro do estribo (mm) <input type="text" value="8"/> Espaçamento do estribo (m) <input type="text" value="0.2"/> Angulo alfa (°C) <input type="text" value="90"/>	<b>Armaduras de tracção</b> <input checked="" type="radio"/> Unico Diâmetro <input type="radio"/> Dois diâmetros Unico diâmetro: Nº <input type="text" value="6"/> D (mm) <input type="text" value="20"/> Dois diâmetros: Nº-1 <input type="text" value="0"/> Nº-2 <input type="text" value="0"/> D-1 (mm) <input type="text" value="0"/> D-2 (mm) <input type="text" value="0"/>	
<b>Metodo de cálculo</b> Análise da Torção <input checked="" type="radio"/> Isolado <input type="radio"/> Combinado Isotermica dos 500°C <input checked="" type="radio"/> Alternativa 1 <input type="radio"/> Alternativa 2	<b>Resultado</b> <input type="button" value="Analisar"/> <input type="button" value="Ajuda"/> A secção analisada resiste durante <input type="text" value="52"/> minutos de fogo (I.P)		<b>Resultado</b> Trd.t (KN.m) <input type="text" value="22.9694"/> Vrd.t (KN) <input type="text"/> Mrd.t (KN.m) <input type="text"/>

Aluno: Adriano Baptista Gonçalves    Orientador: Professor Doutor Rui Faria

Figura A.6: Resultados da verificação da segurança à torsão da secção 40x50cm<sup>2</sup>



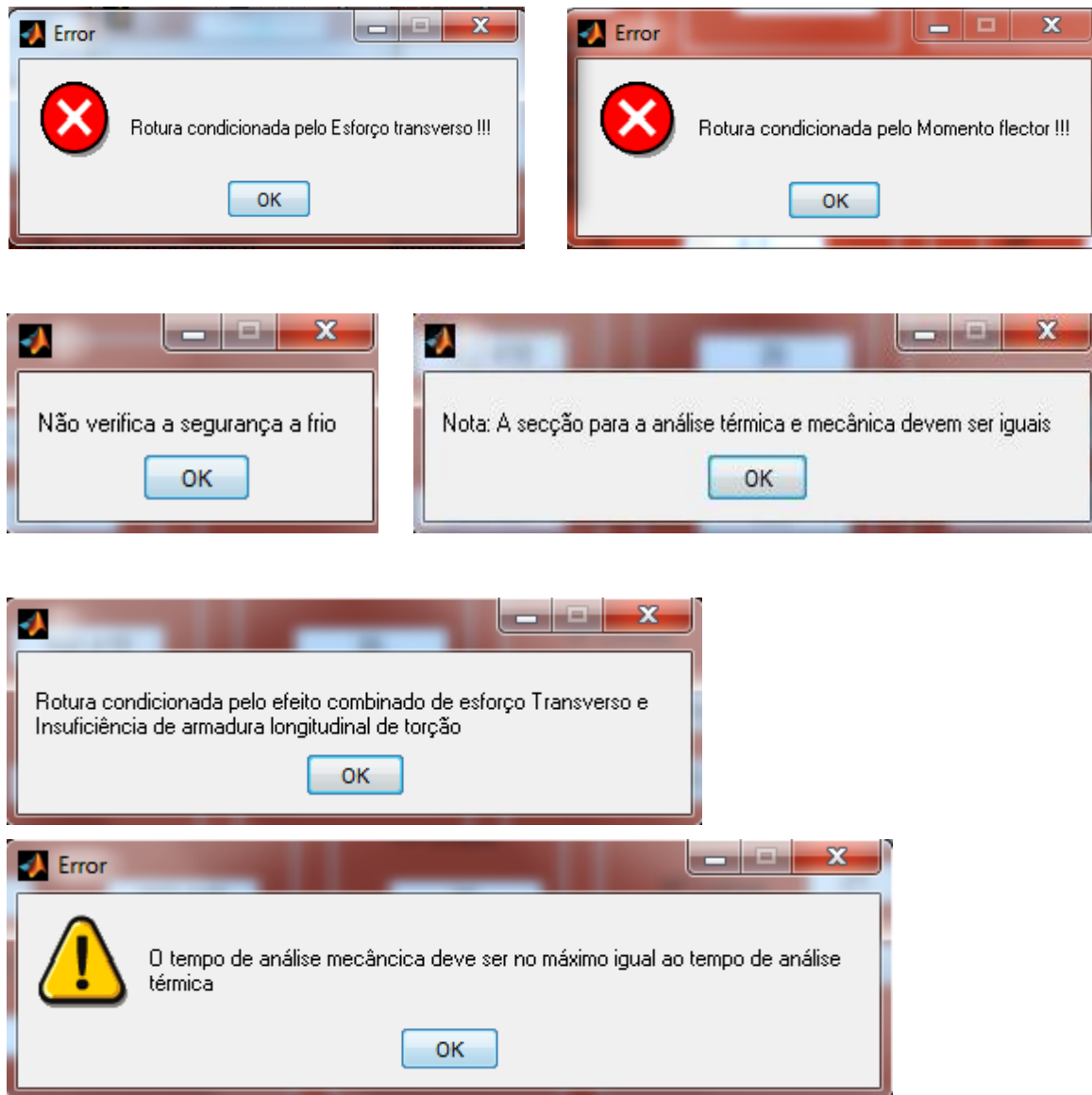


Figura A.7: Exemplos de mensagens de erros e avisos fornecidos pelas aplicações



## **ANEXO B**

## **MANUAL DO UTILIZADOR**

Considerações gerais:

- As aplicações estão direccionadas para a análise das secções submetidas ao incêndio padrão e para secções retangulares, podendo adaptar-se as secções ocas e em T;
- As casas decimais devem ser separadas por pontos;
- Para a execução da análise mecânica é necessário fazer uma análise térmica pelo menos uma vez;
- As secções para a análise térmica e mecânica devem ser iguais;
- O tempo máximo de análise permitido é de três horas;
- O tempo de análise mecânica não deve ser superior ao da análise térmica;
- É possível analisar a secção para um determinado tempo pretendido desde que para esse tempo ela verifique a segurança em situação de incêndio;
- É possível fazer a análise das secções à temperatura ambiente desde que tenha introduzido as características dos materiais e as ações reduzidas do fator de segurança a frio e limitar o tempo de análise para que no máximo a temperatura na secção não ultrapasse a temperatura ambiente;
- A análise do esforço transversal pode ser feita tanto pelo Método da Isotérmica dos 500°C como pelo Método das Zonas;
- É possível verificar a necessidade de armadura de esforço transversal, sendo que a análise só prossegue caso seja necessário essas armaduras;
- A análise da torsão só é feita pelo Método da Isotérmica dos 500°C podendo adaptar uma das duas alternativas proposta. Também é possível fazer a análise da torsão isolada ou combinada com o esforço transversal;
- Na análise da torsão deve garantir a necessidade de armaduras de torsão;
- O número de linhas e colunas delimitadoras dos elementos finitos está limitada pelo número máximo de nós a utilizar no SAFIR (número máximo é de 400)
- Os parâmetros devem ser introduzidos de acordo com as unidades apresentadas na interface de cada aplicação;
- O ângulo alfa (dos estribos) está limitado entre o 45° e o 90°;
- Para a análise do esforço transversal o ângulo da escora comprimida é calculada internamente pelo programa;
- Para a análise da torsão o ângulo da escora comprimida deve ser introduzido pelo utilizador.